صناعة الخلايا الكهروضوئية و تقنياتها



2023



المهندس قسام نجم خليل

الفهرس

الملخص

كان الهدف الأساسي من إصدار هذا الكتاب هو التعرض لتقنيات و خصائص الخلايا الشمسية السليكونية المتبلورة الأكثر شيوعاً في صناعة الألواح الشمسية (الكهروضوئية) بدءاً من الخلايا الشمسية المسماة خلايا المجال السطحي الخلفي BSF والتي أستحوذت على صناعة الألواح الشمسية لعقود لما تتمتع به من سهولة عمليات التصنيع وتحقيق كفاءة كانت تعتبر جيدة ومناسبة في وقتها وكانت الأساس الذي بني عليه التقنيات الأحدث اللاحقة , وقد أُخذ بالأعتبار تحديث نفس خطوط الأنتاج المستخدمة في صناعة خلايا BSF الشمسية لتصنيع التقنيات الأحدث من خلايا PERC و TOPCon لتحقيق الأنتقال السلس في صناعة الخلايا الشمسية دون الحاجة لتغيير خطوط الأنتاج بشكل كامل مما يقلل من كلفة هذا التغيير , وهذا الأمر يعتبر مفتاح رئيسي لنجاح عملية التحديث وجعلها مجدية تجارياً .

ونظراً لقلة المصادر المتاحة للمهتمين بهذا المجال الواعد و الكبير و خصوصاً المصادر التي باللغة العربية , أقصد المصادر التي تتكلم عن تقنيات صناعة الخلايا الشمسية , لذلك حاولت قدر المستطاع جمع ودراسة الأبحاث و الدراسات التي تناولت هذا الموضوع من مصادر رصينة ومعتمدة سواء كانت جامعات عالمية أو مراكز أبحاث دولية أو إصدارات لباحثين معتمدين في مجال الطاقة الشمسية . وتم جمع البيانات ودراستها و المقارنة بينها خصوصاً لكونها في بعض الجوانب تحتوي على معلومات متباينة تبعاً للنتائج المتحققة من الدراسات و التجارب المختبرية التي أُجريت . وكذلك شحة المصادر المتاحة للتقنيات التي تعتبر حديثة مثل خلايا ال TOPCon وصعوبة الوصول للمعلومات الدقيقة عن صناعتها لكونها حديثة الأنتشار التجاري و تعتبر تقنيات تصنيعها من ضمن الأسرار الصناعية بالنسبة للشركات الرائدة و السباقة في هذا المجال .

بالأضافة لصعوبات تحديد الدراسات والنتائج المختبرية الأكثر دقة بالنسبة لخلايا شمسية لا زالت تحت الأختبار وتعاني من مشاكل تعيق نجاحها تقنياً و تجارياً مثل خلايا البروفسكايت الواعدة والتي أستحوذت على أهتمام العلماء والباحثين منذ سنوات و من الممكن أن تستحوذ على سوق الواح الطاقة الشمسية في السنوات المقبلة إن نجحوا في حل مشاكلها التقنية .

وتكلمت بشكل مختصر عن تقنيات أخرى أقل أنتشاراً نسبياً وهي الخلايا الشمسية الغير متجانسة HIT , خلايا الأتصال الخلفي المتداخل IBC , الخلايا الشمسية العضوية OPV , مقابل التوسع في شرح خلايا BSF , PERC , TOPCon لأهميتها بالأضافة للتوسع بعض الشيء بالنسبة لخلايا البروفسكايت الشمسية .

تم جمعها في الفصل الخامس من هذا الكتاب , ولكن كانت هناك حاجة للتطرق لصناعة الخلايا الشمسية السليكونية بدءاً من المواد الأولية وبيان العمليات الصناعية التي تجري عليها وصولاً للسليكون بدرجة نقاوة 99.999999 % . ومن ثم عمليات أنتاج السبائك والتشويب و تصنيع الشرائح السليكونية التي تكون معدة لأنتاج الخلايا الشمسية .

ثم تناولت موضوع تصنيع الخلايا الشمسية بالإعتماد على تقنية تصنيع خلايا ال BSF وتكلمت عن أهم العمليات الصناعية و كذلك بعض تقنيات الأنتاج التي تعتبر أساس صناعة الخلايا الشمسية وهي عمليات الترسيب بأنواعها . من ثم تكلمت عن صناعة اللوح الشمسي النمطي وشرحت بشكل مختصر عن كل جزء يدخل في تركيب اللوح الشمسي .

و كذلك تناولت بشكل مختصر المبادئ الفيزيائية (فيزياء الكم) الأساسية التي تفسر سلوك الذرات و الألكترونات والفجوات وتعطي تفسير لألية أنتاج الكهرباء من تعرض خلية سليكونية كهروضوئية لأشعة الشمس , بالأضافة لشرح مبسط لمبدأ عمل الخلية الشمسية . كل هذه المواضيع جمعتها في اول أربعة فصول .

كان الهدف من هذا الكتاب هو بناء فكرة متكاملة عن اللوح الشمسي و الدخول في عالم صناعة الخلايا الشمسية والذي هو مجهول لكثيرين من الذين يعملون أو يدرسون في مجال الطاقة الشمسية . أو ان يكون هذا الكتاب دليل و طريق يسلكه من يريد الدخول في عالم الطاقة الشمسية لتكون خطوة أولية صحيحة للفهم العلمي السليم . ومحاولة بسيطة مني في المساعدة لتوضيح أمور قد يجهلها بعض العاملين والدارسين لهذا المجال وخصوصاً المهندسين .

المقدمة

تعدُّ الطاقة أحد أكبر التحديات التي تواجه البشرية في القرن الحادي والعشرين .وبدايةً من الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر، كانت صور الوقود الأحفوري، مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، هي مصادر الطاقة الأساسية لكل شيء حيوي بالنسبة للمجتمع البشري بدءًا من المحرّكات البخارية حتى محرِّكات الديزل والاحتراق الداخلي، ومن الكهرباء حتى تدفئة وتبريد المباني، ومن الطهي وتسخين الماء والإضاءة حتى الأجهزة الكهربائية والإلكترونية المختلفة، هذا إلى جانب معظم وسائل النقل، ولكن مصادر الوقود الأحفوري التي تُعد صورة مخزَّنة عبر مئات الملايين من السنين باتت تنفد بسرعةٍ بسبب الاستخدام الزائد .علاوة على ذلك، أدى حرق تلك المصادر إلى الإضرار بالبيئة في كوكب الأرض، وما زال هذا يحدث حتى الآن.

من المعروف أن مصادر الطاقة البديلة أو المتجددة غير مصادر الوقود الاحفوري قد دُرست واستُغلَّت .فالطاقة المائية، وهي من مشتقات الطاقة الشمسية، تمثِّل حاليًا أثنين بالمئة من الطاقة المستهلكة في العالم .وقد تطورت التقنيات في هذا المجال، وتُستكشف وتُستغل المصادر المتاحة حاليًا بكثافة .وهناك أيضًا طاقة الرياح، التي تُعد بدورها من مشتقات الطاقة الشمسية، والتي بدأ استهلاكها يزيد على نحو سريع، لكن مصدر تلك الطاقة المتقطعة على نحو كبير متناهٍ أيضًا . وهناك الطاقة النووية، لكنها طاقة غير متجددة .كما أن المصدر المعدني المستخدم فيها، وهو اليورانيوم، متناهٍ .هذا بالإضافة إلى أن مشكلات منع الحوادث في المحطات النووية والتعامل مع المخلفات النووية لا تزال قائمة.

تعد الطاقة الشمسية أكثر مصدر طاقة متاح للمجتمع البشري .ونظرًا لأن إجمالي الطاقة الشمسية التي تمتصها الأرض يصل إلى $4 * 10^6$ EJ / year ، فإنها تمثِّل عشرة أضعاف الطاقة المستهلكة في العالم .

يُعد استخدام الطاقة الشمسية قديمًا قدم التاريخ البشري، لكن حتى وقتنا الحالي تُعد هذه الطاقة، من بين الأنواع المتعدِّدة لمصادر الطاقة المتجدِّدة، الأقل استخدامًا؛ فهي حاليًا توفر فقط نحو 0.1 بالمائة من إجمالي الطاقة المستهلكة في العالم ، أو 0.00001 بالمائة من الإشعاع الشمسي المتاح . مع ذلك ، ونتيجة للبحث المستفيض والتطوير المستمر، يحدث حاليًا تقدم سريع على نحو مذهل في استخدام هذه الطاقة، وخاصة الخلايا الكهروضوئية الشمسية؛ لذلك من المنطقي توقُّع أن تلك الطاقة ستصبح في النصف الأخير من القرن الحادي والعشرين مصدرَ الطاقة الرئيسي، متجاوزةً كل مصادر الطاقة المستمدَّة من الوقود الاحفوري.

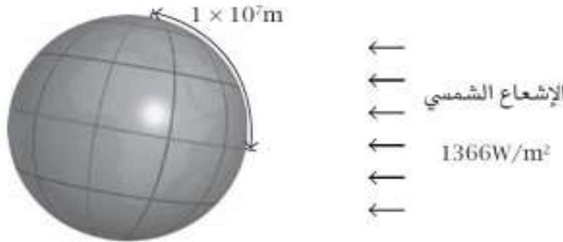
وفقًا للقياسات المُثبتة، يبلغ متوسط كثافة قدرة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي للأرض مباشرةً 1366 واط/م2 والمعروف على نطاق واسع باسم الثابت الشمسي .وتعريف المتر هو واحد على عشرة مليون من خط زوال الأرض الممتد من القطب الشمالي إلى خط الاستواء ؛ وهذا التعريف ما زال دقيقًا تبعًا للقياسات الحديثة؛ لذا فإن نصف قطر الأرض يساوي $2/\pi * 10^7$ m , إذن فالقدرة الإجمالية للإشعاع الشمسي التي تصل الى الأرض هي (15) :

$$1366 * 4 / \pi * 10^{14} = 1.73 * 10^{17} \text{ W}$$

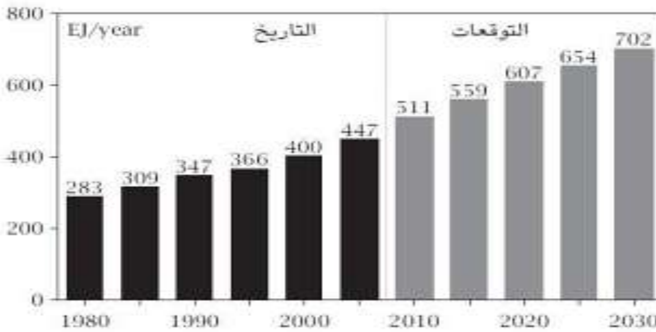
عدد الثواني في اليوم 86400 ثانية , وفي المتوسط , عدد الأيام في العام 365.2422 , وهكذا يكون أجمالي طاقة الأشعاع الشمسي الواصل الى الارض كل عام (15) :

$$1.73 * 10^{17} * 86400 * 365.2422$$

أو 5460000 EJ/year , وبمعرفة إن معدل الأستهلاك العالمي للطاقة سنوياً تقريباً 500EJ , وهكذا فأن نسبة 0.01 بالمائة من الطاقة الشمسية السنوية التي تصل للارض تكفي العالم بأسره من الطاقة . (15)



الطاقة الشمسية السنوية التي تصل إلى سطح الأرض. يبلغ متوسط القدرة الشمسية على الأرض $1366W/m^2$. ويصل طول خط زوال الأرض، تبعًا لتعريف المتر، 10000000m. ويبلغ إجمالي الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض كل عام 5460000EJ.



الاستهلاك العالمي للطاقة، فيما بين عامي 1980 و2030. المصدر: إدارة معلومات الطاقة، وهي الجهة التابعة للحكومة الأمريكية التي تقدم إحصائيات الطاقة الرسمية. التاريخ: «التقرير السنوي عن الطاقة الدولية لعام 2004» (مايو–يوليو 2006)، موقع الويب www.eia.doe.gov/iea. التوقعات: إدارة معلومات الطاقة، تقرير «توقعات الطاقة الدولية»، الصادر في عام 2007.

لا يصل كل الإشعاع الشمسي الساقط على الغلاف الجوي الأرضي إلى سطح الأرض. فنحو 30 بالمائة من الإشعاع الشمسي ينعكس في الفضاء .ونحو 20 بالمائة منه يُمتَص من جانب السُّحب والجزيئات في الهواء ونحو ثلاثة أرباع سطح الأرض مسطحات مائية ، ولكن حتى إذا كان بالإمكان استغلال 10 بالمائة فقط من إجمالي الإشعاع الشمسي، فإن 0.1 بالمائة منها فقط يمكنها أن تمد العالم بأسره بالطاقة .

سنستعرض في هذه الكتاب المبسط صناعة الخلايا الشمسية بدءاً من إنتاج السيليكون من المواد الأولية و إنتاج السيليكون النقي , ومن ثم إنتاج شرائح السيليكون النقي و عمليات تشويبها ومن ثم صناعة الخلية الشمسية والتطرق لأغلب الطرق والتقنيات المستخدمة و مقارنتها بالنتائج المختبرية .

ومن ثم نستعرض تقنيات الخلايا الشمسية و مميزاتها و طرق تصنيعها ونتطرق بشرح مبسط لكل العمليات التي ترافق تصنيع الخلايا الشمسية .

المهندس قسام نجم خليل

الفصل الأول

صناعة الخلية الكهروضوئية

1 – 1 هيكلية صناعة الخلايا الشمسية Solar Cell Industry Structure

في الصناعة الكهروضوئية ، عادةً ما تتضمن سلسلة الإنتاج من الكوارتز إلى الخلايا الشمسية ثلاثة أنواع رئيسية من الشركات :

1 - منتجي الخلايا الشمسية من الكوارتز .

2 - منتجي رقائق السيليكون من الكوارتز , الشركات التي تقوم بعملية الإنتاج حتى تقطيع رقائق السيليكون ثم تبيع هذه الرقائق إلى المصانع التي تقوم بإنتاج الخلايا الشمسية الخاصة بها .

3 - منتجي الخلايا الشمسية من رقائق السيليكون ، والتي تشير بشكل أساسي إلى مصنعي وحدات الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع معدات إنتاج الرقاقة إلى الخلية الخاصة بهم للتحكم في جودة وسعر الخلايا الشمسية.

تُصنع الخلايا الشمسية غالبا من مادة السليكون . والسليكون عنصر واسع الانتشار في القشرة الارضية و لكن يجب استخدام مصادر للسليكون تكون ذات نقاوة عالية جدا حتى لا تسبب مشاكل صناعية في عملية انتاج السليكون النقي . لكن عملية تصنيع الخلايا تعتبر صعبة ومكلفة , وذلك للخلايا البلورية أكثر من الخلايا الرقيقة , ومن أجل تصنيع هذه الخلايا بكفاءات عالية لا بد من إستخدام السليكون النقي حيث تم تطوير العديد من التقنيات للحصول على السليكون النقي إنطلاقاً من المواد الأولية التي تحتوي عليه مثل السليكا الموجودة في الرمال .

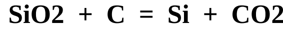
تتألف عملية إنتاج الخلايا و الألواح الكهروضوئية بشكل أساسي من ثلاث صناعات متتالية :

عملية إستخراج السليكون و إشابته , عملية تشكيل رقائق الخلايا وحيدة البلورة أو متعددة البلورات , ثم الانتاج النهائي للخلية واللوح الكهروضوئي .

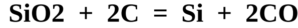
1 – 2 إنتاج السيليكون النقي متعدد البلورات بإستخدام فرن القوس الكهربائي

يتم تصنيع الخلايا الشمسية اولا بصهر احجار السليكا النقية (سليكون اوكسايد) بأفران خاصة لأنتاج خام السليكون . حيث يتم وضع احجار السليكا والفحم كمصدر للكاربون في افران خاصة ARC Furnace (1 , 28) فينصهر السليكون والكاربون لينتج ثاني اوكسيد الكاربون والسليكون الخام بنقاوة تتجاوز 98% ويكون ذائبا بعد ذلك يتجمد ويتم تكسيره لقطع صغيرة .

يتم تحضير السيليكون من تفاعل السليكا عالية النقاوة مع الخشب , الفحم الحجري , و الفحم في فرن القوس الكهربائي بأستخدام أقطاب كهربائية من الكربون , وعند درجة حرارة عالية فوق 1900 درجة مئوية , يقوم الكربون بإرجاع السيليكا الى سيليكون وفق المعادلة (31 , 28) :

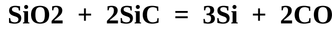


$$SiO_2 + C = Si + CO_2$$

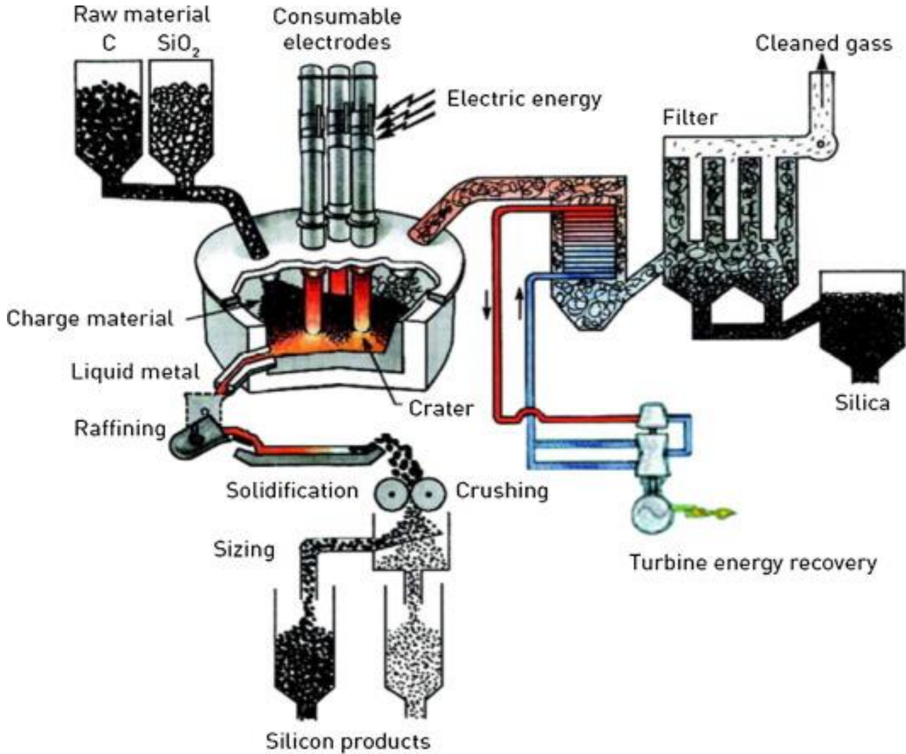


$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$$

يجمع السيليكون السائل أسفل الفرن ثم يتم تصريفه وتبريده , وتصل نقاوة السليكون المنتج بهذه الطريقة الى 98% , ويمكن أن يتشكل كربيد السيليكون SiC خلال هذه العملية , لكن بأبقاء تركيز السيليكا عالياً يمكن التخلص من كربيد السيليكون وفق العملية الكيميائية (31 , 28) :



$$SiO_2 + 2SiC = 3Si + 2CO$$



يمكن الحصول على سيليكون نقي فوق 99,9% بشكل مباشر من السيليكا أو مركبات السيليكون الأخرى عن طريق التحليل الكهربائي بأستخدام الأملاح الذائبة,

ويمكن إستخدام هذه الطريقة للحصول على السيليكون المطلوب لصناعة الخلايا الشمسية دون إصدار غاز ثاني أكسيد الكربون وبأستخدام طاقة أقل .

وتعتمد تقنيات تنقية السيليكون على إنه عند إذابة السيليكون وثم إعادته للحالة الصلبة , فأن الأجزاء الأخيرة التي تتصلب من الكتلة تحتوي النسبة الأكبر من الشوائب .

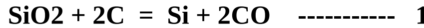
على الرغم من فائدة السيليكون المعدني ، حتى عند درجة نقاء 99 ٪ ، فهو ليس قريبًا من النقاء المطلوب لتطبيقات أشباه الموصلات والتطبيقات الكهروضوئية.

الطريقة السابقة تستخدم التيار المستمر (المباشر) كمصدر للطاقة الكهربائية , والذي يمكن التحكم فيه بشكل أكبر ، و أكثر كفاءة من فرن طاقة التيار المتردد .

يقلل التكوين المغلق بشكل كبير للفرن من فقد طاقة الإدخال كأول أكسيد السيليكون وغازات أول أكسيد الكربون .

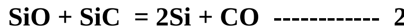
1 – 3 فرن القوس الكهربائي المعتمد على التيار المتناوب (المتردد) لأنتاج السيليكون النقي

يتم إنتاج السيليكون في فرن قوس التيار المتناوب المفتوح عن طريق الاختزال الكربوني لثاني أكسيد السيليكون. يمكن تمثيل تفاعل الاختزال الكلي على النحو التالي (33):



$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO \quad \text{-----------} \quad 1$$

الوسيطان الرئيسيان الضروريان لإنتاج السيليكون هما أول أكسيد السيليكون وكربيد السيليكون . التفاعل هو(33) :



$$SiO + SiC = 2Si + CO \quad \text{------------} \quad 2$$

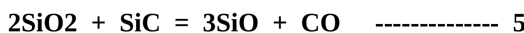
ينتج أول أكسيد السيليكون عن طريق تفاعل ثاني أكسيد السيليكون مع الكربون أو كربيد السيليكون أو السيليكون ، وفقًا للتفاعلات التالية(33) :



$$SiO_2 + SiC = SiO + CO + Si \quad \text{--------------} \quad 3$$



$$SiO_2 + C = SiO + CO \quad \text{--------------} \quad 4$$



$$2SiO_2 + SiC = 3SiO + CO \quad \text{--------------} \quad 5$$

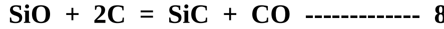


$$SiO_2 + Si = 2SiO \quad \text{----------------} \quad 6$$

ينتج كربيد السيليكون عن طريق تفاعل الكربون مع ثاني أكسيد السيليكون أو أول أكسيد السيليكون ، كما هو موضح أدناه (31 , 33) :



$$SiO2 + 3C = SiC + 2CO \text{ ------------ } 7$$



$$SiO + 2C = SiC + CO \text{ ------------ } 8$$

في العملية النموذجية لفرن القوس المغمور ، يضاف خليط شبه متكافئ من الكربون والسيليكا إلى الجزء العلوي من الفرن . عندما ينزل الخليط في الفرن ، يتشكل أول أكسيد السيليكون وكربيد السيليكون وفقًا للتفاعلات من (3) إلى (8) . ينتج عن إنتاج أول أكسيد السيليكون المفرط الذي لا يتفاعل مع الكربون أو يتكثف في الفرن فقدان السيليكون . التفاعل الأكثر شيوعًا لإنتاج أول أكسيد السيليكون هو التفاعل المتساوي المولي للسيليكا مع كربيد السيليكون وفقًا للتفاعل (3) . يصعد أول أكسيد السيليكون ، المتكون في منطقة الكهف بالفرن ، عبر الشحنة حيث يتم حصره بشكل مثالي عن طريق التفاعل مع الكربون لتكوين كربيد السيليكون وفقًا للتفاعل (8) .

تتطلب أفران قوس التيار المتناوبة (AC) مدخلات طاقة عالية لإنتاج السيليكون وهي غير فعالة للغاية من وجهة نظر استخدام الطاقة. يتم استخدام حوالي 31 بالمائة فقط من إجمالي مدخلات الطاقة للفرن ، سواء في شكل طاقة كهربائية أو طاقة كيميائية من المواد المختزلة ، لتقليل السيليكا. يتم فقد نسبة 69٪ المتبقية من الطاقة.

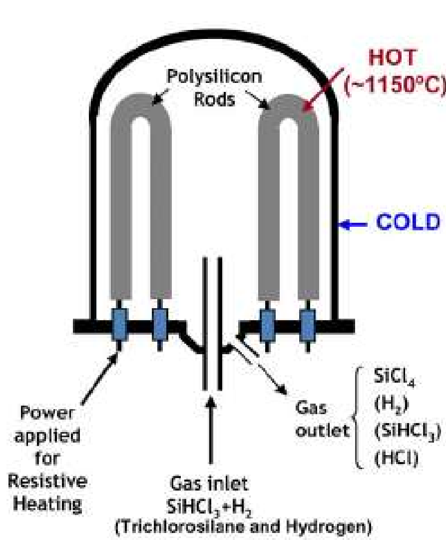
المراحل التالية من التنقية ترفع السيليكون إلى مستوى النقاء اللازم لتصنيع أشباه الموصلات .

1 – 4 تنقية السيليكون بطريقة Siemens process

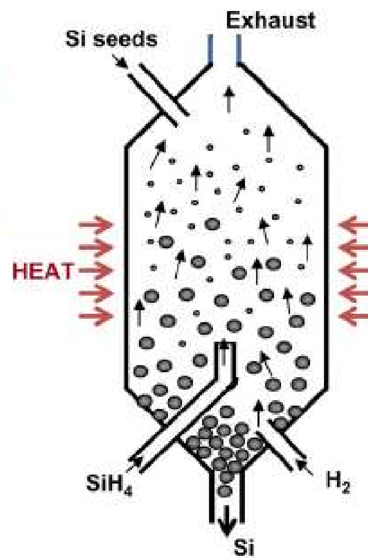
يبدأ التنقية بخلط مسحوق السلكون المعدني مع غاز حمض الهيدروكلوريك الساخن . ينتج هذا التفاعل سيلانات ، وهي مركبات لها ذرة سليكون مركزية محاطة بأربعة ملحقات ، في هذه الحالة ثلاث ذرات كلور وهيدروجين واحد. هذا ثلاثي كلورو سيلان عبارة عن غاز عند درجة حرارة داخل غرفة التفاعل ، مما يسهل التعامل معه وتنقيته عن طريق التقطير التجزيئي . عندما يتم تنقية غاز ثلاثي كلورو سيلان بشكل كافٍ ، يمكن أن يبدأ إنتاج multi-silicon .

عملية Siemens هي الطريقة الأساسية هنا ، وهي شكل من أشكال ترسيب البخار الكيميائي . تحتوي حجرة التفاعل الكبيرة التي على شكل جرس على عدة أسلاك رفيعة من السيليكون عالي النقاوة ، والتي يتم تسخينها إلى 1150 درجة مئوية عن طريق تمرير تيار كهربائي . يتدفق خليط من ثلاثي كلورو سيلان الغازي والهيدروجين إلى الغرفة ؛ يتحلل الغاز على القطب الساخن تاركًا وراءه السيليكون النقي الذي يتراكم في قضبان يبلغ قطرها حوالي 150 سم . يمكن أن يكون للسيليكون متعدد البلورات المصنوع بواسطة عملية Siemens نقاء 99,99999 أو أكثر . يستخدم السيليكون متعدد البلورات بشكل أساسي للخلايا الكهروضوئية . الشكل أدناه لعملية تنقية السيليكون (1,34)





Siemens Reactor



Fluidized Bed Reactor

في حين أن عملية سيمنز هي العمود الفقري للسيليكون متعدد البلورات ، إلا أن لها عيوبها . المشكلة الرئيسية هي أنها مستهلك كبير للطاقة وللحفاظ على البلورات المتنامية ساخنة بدرجة كافية لتحطيم المواد الخام يتطلب الكثير من الكهرباء.

للتغلب على هذه المشكلة ، يتم أحيانًا استخدام عملية مفاعل الطبقة المميعة Fluidized Bed Reactor FBR ويكون له شكل برج مرتفع تصطف جدرانه بأنبوب كوارتز .

يتم حقن غاز السيلان ، إما ثلاثي كلورو سيلان أو أحادي السيلان المألوف ، وهو مجرد ذرة سيليكون محاطة بأربعة هيدروجين ، يتم ترسيب مسحوق السيليكون في غرفة التفاعل من الأعلى ، بينما يتم حقن غاز الهيدروجين المسخن في قاع الحجرة من خلال سلسلة من الفوهات . يحافظ تدفق الغاز على مسحوق السيليكون الساخن مائعًا ، مما يسمح له بالاختلاط بغاز السيلان وتكسيره. كما هو الحال في عملية سيمنز ، يتراكم السيليكون على جزيئات السيليكون ، والتي تصبح في النهاية أكبر من أن تدعمها الطبقة المميعة . تسقط حبات السيليكون متعدد الكريستالات في قاع الحجرة ، حيث يمكن جمعها .

إلى جانب توفير الطاقة - ما يصل إلى 90٪ أقل عند استخدام أحادي السيلان كمادة خام - تتمثل الميزة الرئيسية لطريقة FBR في أنها عملية مستمرة ، حيث يمكن ببساطة ضخ الخرزات النهائية خارج الغرفة . وتعتبر عملية Siemens عملية متقطعة ، حيث يجب فتح غرفة المفاعل لإزالة قضبان السيليكون المتعدد عند الانتهاء . ومع ذلك ، فإن FBR Multi-silicon لا تتقشر تماماً ، ويرجع ذلك جزئيًا إلى أن إدارة ديناميكيات السوائل داخل غرفة التفاعل قد تكون صعبة . السبب الرئيسي لتفضيل طريقة سيمنز هو أنها عملية بسيطة للغاية ، وطالما أن المصانع يمكن أن تكون بالقرب من مصدر للكهرباء الرخيصة .

بأستخدام أي من هاتين الطريقتين يمكن تحضير السيليكون المتعدد البلورات الى درجة نقاء عالية للغاية .

1 – 5 إنتاج السيليكون متعدد البلورات Multi-crystalline Silicon Production

من أجل صنع خلايا سيليكون متعددة البلورات ، توجد طرق مختلفة : (38)

1.) طريقة التبادل الحراري (HEM)

2.) الصب الكهرومغناطيسي (EMC)

3.) نظام التصلب الاتجاهي (DSS)

نظام التصلب الأتجاهي DSS هي الطريقة الأكثر شيوعًا ، بهذه الطريقة ، يتم تمرير السيليكون عبر فرن إنضاج سبيكة DSS (DSS ingot growth furnace) ومعالجته إلى كتل سيليكون نقية .

أثناء صب السبائك ، غالبًا ما يكون السيليكون مشوباً مسبقًا (pre-doped) قبل التقطيع وبيع أقراص الرقاقة للمصنعين . المنشطات أو التشويب هي في الأساس عملية إضافة الشوائب إلى رقاقة السيليكون البلورية لجعلها موصلة للكهرباء . مواد المنشطات الموجبة (من النوع p) و السالبة (من النوع n) هي في الغالب البورون ، الذي يحتوي على 3 إلكترونات (3-التكافؤ) ويستخدم في المنشطات من النوع p (positive p-type) ، والفوسفور ، الذي يحتوي على 5 إلكترونات (5-التكافؤ) ويستخدم في المنشطات من النوع n (negative n-type) . غالبًا ما تكون رقاقات السيليكون مشوبة مسبقًا بالبورون p-type .



1 – 6 إنتاج السيليكون أحادي البلورة Mono-crystalline silicon

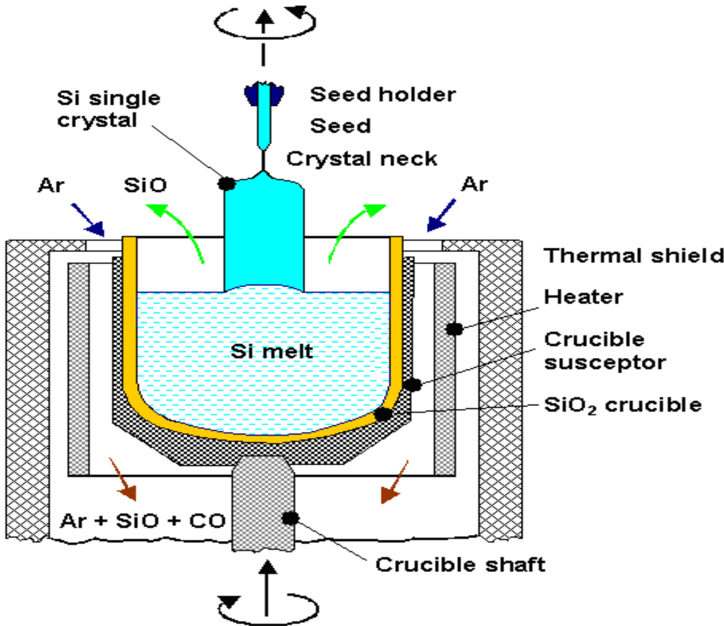
أن نقاء السيليكون ليس هو المقياس الوحيد للسيليكون , في بعض الأحيان تكون طبيعة التركيب البلوري للمنتج النهائي لا تقل أهمية عن النقاء , تتمثل الخطوة التالية في إنتاج السيليكون في إنشاء السيليكون البلوري الأحادي mono-silicon , حيث تكون سبيكة السيليكون بأكملها عبارة عن بلورة واحدة .

أن تطوير بلورة أحادية من السيليكون فائقة النقاء الى حجم مفيد صناعياً ليس بالأمر الهين , ويعتمد على بعض الحيل التي أكتشفها الكيميائي البولندي فان كزوكرالسكي في عام 1916 م (35,36) .

قد يكون التطبيق الأكثر أهمية هو نمو أو تشكيل سبائك أسطوانية كبيرة **large cylindrical ingots** , أو كرات **Boules** من السليكون أحادي البلورات المستخدم في صناعة الألكترونيات وصناعة الخلايا الشمسية , وكذلك يمكن استخدام هذه الطريقة مع اشباه الموصلات الاخرى مثل زرنيخيد الغاليوم **Gallium arsenide** .

غالباً ما يشار الى السليكون أحادي البلورات بـ **Monocrystalline Silicon (mono-Si)** المتشكل بطريقة **Czochralski** بمصطلح معرف بـ **Monocrystalline Czochralski silicon (Cz-Si)**

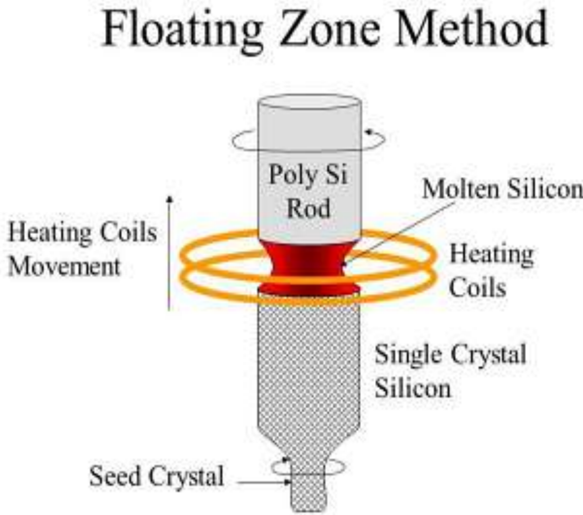
بأختصار , يتم صهر السيلكون متعدد البلورية في بوتقة كوارتز في جو خامل , ويتم إنزال قضيب السحب الذي يحمل بلورة واحدة من السيليكون شديدة النقاء والموجهة بدقة شديدة الى السيليكون المنصهر , تتسبب البلورة في تكثيف السيليكون وأستمرار الهيكل البلوري حيث يتم سحب قضيب السحب ببطء من الفرن أثناء الدوران . يمكن إنتاج سبائك أحادية البلورية يصل قطرها الى **450** ملم بإستخدام طريقة **Czochralski** . الشكل أدناه (35) .



1 – 7 إنتاج السيليكون أحادي البلورية بطريقة المنطقة العائمة Floating zone method

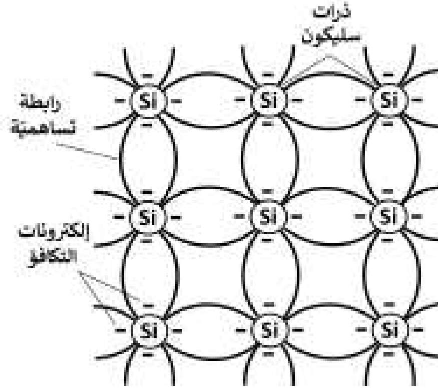
تستخدم قضيب السيليكون متعدد البلورية multi-silicon كمادة البداية داخل غرفة تفاعل بها جو غاز خامل , يتم أرسال إشارة تردد لاسلكي عبر ملف يحيط بالقضيب , تقوم أشارة التردد الراديوي بتسخين السليكون مما يؤدي الى إنشاء منطقة إندماج , تتم إضافة بلورات السيليكون فائقة النقاء الى منطقة الإنصهار , مما يتسبب في تبلور السيليكون المصهور من حولها , يتم تحريك الملف لأعلى القضيب مما يؤدي الى تحريك منطقة التسخين حتى يصبح القضيب بأكمله عبارة عن بلورة واحدة من السيليكون . كما في الشكل أدناه (38) .

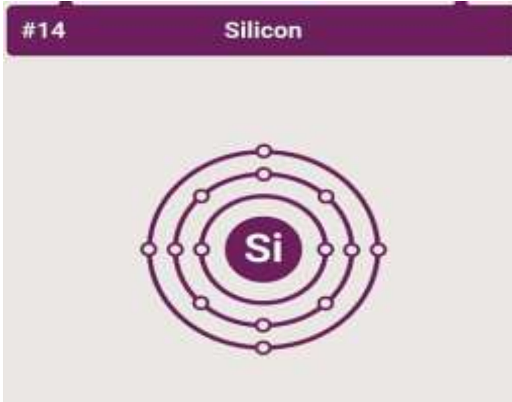
تتميز منطقة السيليكون العائمة أحادية البلورة بعدم ملامستها أبداً لجدران الكوارتز لبوتقة طريقة Czochralski وبالتالي سيكون لديها تلوث أقل بالأكسجين والشوائب الأخرى .



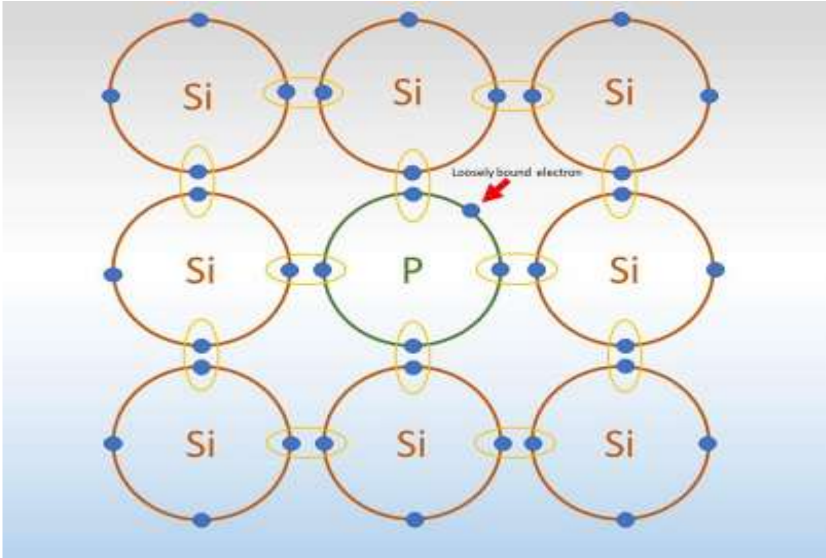
1 – 8 التركيب الذري للسيليكون من نوع n-type و نوع p-type

في البدأ نتكلم عن تركيب ذرة السيليكون , حيث يحتوي المدار الخارجي لذرة السيليكون على أربع ألكترونات , و يرتبط كل ألكترون لذرة السيليكون مع الكترون لذرة سيليكون اخرى برابطة تساهمية , وفي هذه الحالة تكون مستقرة كهربائيا ولا يمكن أستخدامها لصناعة الخلايا الشمسية .

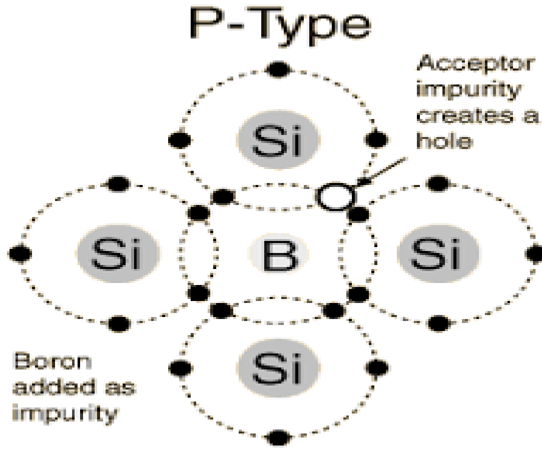




لذلك يجب أضافة عناصر أخرى مع السيليكون لتكون قابلة للتوليد الكترونات و بالتالي سريان تيار كهربائي . فعند تشويب السيليكون بعنصر الفسفور أو الزرنيخ أو أي عنصر مانح من المجموعة الخامسة (غالباً يستخدم الفسفور) فأن ذرة الفسفور تمتلك خمس ألكترونات في مدارها الخارجي وعند أرتباطها بذرة السيليكون سترتبط أربع الكترونات للمدار الخارجي لذرة السيليكون مع أربع الكترونات للمدار الخارجي لذرة الفسفور و يتبقى الالكتون الخامس غير مرتبط مما يؤدي لتكون شريحة سيليكون غنية بالالكترونات الحرة , تكون ما يسمى بالسيليكون السالب أو سيليكون نوع n-type . (1)

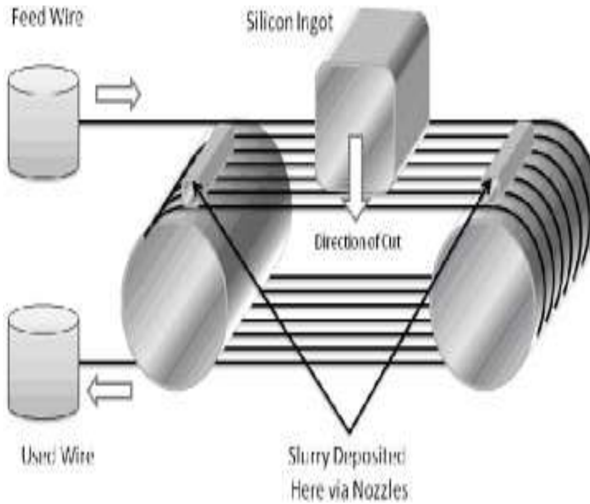


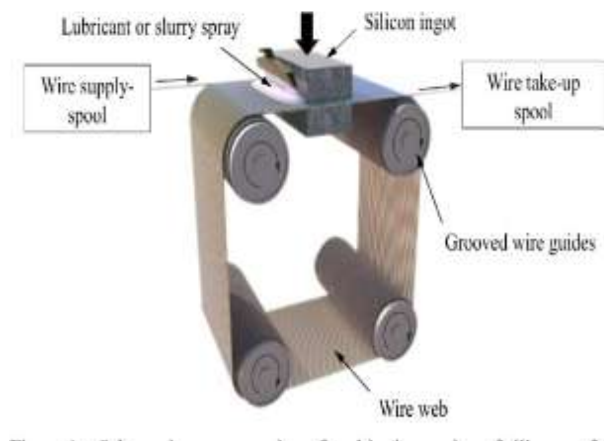
وعند أضافة عنصر البورون (أو أي عنصر متقبل من المجموعة الثالثة) الذي يحتوي على ثلاثة ألكترونات في مدارها الخارجي سترتبط هذه الألكترونات الثلاثة مع ثلاث ألكترونات للمدار الخارجي للسيليكون الأربعة , عندها ستتولد فجوة مكان الرابطة التساهمية المحتوية على الكترون واحد , فتتكون شريحة سيليكون غنيةبالفجوات الموجبة , و سيتكون ما يسمى السيليكون الموجب أو سيليكون نوع p-type . (17)



1 – 9 تقطيع شرائح السيليكون Slicing Silicon Wafers

يتم تقطيع سبائك السليكون المتبلور الى شرائح بسمك 150 الى 180 مايكرومتر وبأبعاد محددة (1) , ويتم التقطيع باستخدام سلك خاص من الماس وبعض المركبات الاخرى ويكون سمك السلك من 100 الى 150 مايكرومتر (1) . فتتكون شرائح السليكون Wafers والتي تستخدم لانتاج الخلايا الشمسية Solar Cells . كما في الشكل أدناه (1).




Lubricant or slurry spray
Silicon ingot
Wire supply-spool
Wire take-up spool
Grooved wire guides
Wire web


Single crystalline Si solar module
Poly-Si chunk
Poly-Si granule
Ingot
Wafer
Cell
Module
Multi crystalline Si solar module

اذن مختصر عملية انتاج شرائح السليكون المستخدمة لانتاج خلايا الطاقة الشمسية هي :



1 – 10 أنواع الخلايا الشمسية :

توجد ثلاثة أنواع رئيسية لخلايا الطاقة الشمسية , سنوضحها بأيجاز (1) :

اولا / خلايا السليكون : وتنقسم الى /

1 - خلايا السليكون المتبلور : وهي بدورها تنقسم الى قسمين

*** احادي التبلور Mono Crystalline : وتتكون من بلورات احادية يعني لو تم فحص سطح الخلية من اي مكان ستكون عبارة عن بلورة واحدة وهذه البلورات تكون ذات ابعاد محددة .**

*** متعدد البلورات Multi Crystalline : وتكون ذات بلورات متعددة و تنتج هذا النوع من الخلايا حسب طريقة صناعة الخلية الشمسية . ولكن نلاحظ ان انتشار مصطلح poly للتعبير عن الخلايا متعددة البلورات وفي الحقيقة هو تعبير غير دقيق وسيتعارض مع مصطلحات تستخد م في التقنيات الحديثة مثلا عند التكلم عن تقنية Topcon سنجد مصطلح عن ترسيب طبقة من خام السيليكون فيذكرمصطلح poly فهذا المصطلح يكون لترسيب طبقات من خام السليكون اما للتعبير عن مصطلح متعدد البلورات نستخدم multi .**

2 – خلايا الأمورفيس : وتختلف عن الخلايا المتبلورة بأنها لا تتبع اي بلورات محددة واقرب للزجاج

3 – خلايا هجينة HIT : وهي خليط بين الامورفيس والخلايا المتبلورة .

ثانيا / خلايا أشباه موصلات مركبة : وهي ذات كفاءة عالية وتستخدم عناصر الجدول الدوري العمود الثالث والخامس او الثاني والرابع وهكذا ومن اشهرها خلايا الكادميوم .

وتنقسم الى :

**** III-V**

**** CIGS**

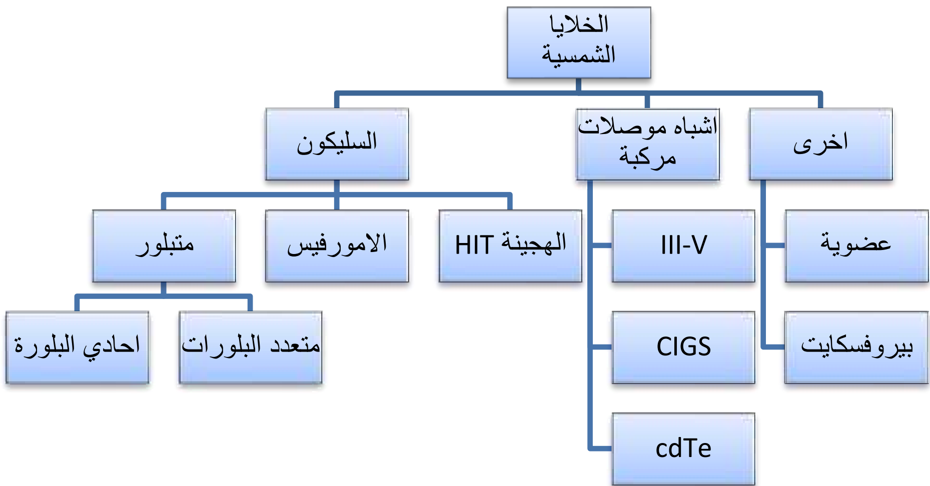
**** cdTe**

ثالثا / خلايا اخرى : وتنقسم الى :

1 – خلايا عضوية

2 – خلايا بيروفسكايت : والتي من المتوقع انها ستسيطر على سوق الخلايا في العشر سنوات المقبلة اذا حلت مشاكلها بعدم أنحدارالكفاءة .

مخطط يوضح أنواع الخلايا الشمسية (1) :



1 – 11 معالجة رقاقات السيليكون إلى خلايا شمسية processing of Si- wafers into solar cells

تتألف العملية القياسية لإنتاج الخلايا الشمسية من رقائق السيليكون من 9 خطوات من أول فحص الجودة لرقائق السيليكون إلى الاختبار النهائي للخلية الشمسيةالجاهزة . (38)

1 – 11 – 1 الخطوة 1: الفحص المسبق والمعالجة المسبقة pre-check and pretreatment

تخضع أقراص رقاقة السيليكون الخام أولاً لفحص مسبق يتم خلاله فحصها من حيث الشكل الهندسي وتوافق السماكة والأضرار مثل الشقوق والكسور والخدوش أو غير ذلك من الحالات الشاذة . بعد هذا الفحص المسبق ، يتم تقسيم الرقاقات وتنظيفها بالصابون الصناعي لإزالة أي بقايا معدنية أو سوائل أو بقايا إنتاج أخرى من السطح والتي من شأنها أن تؤثر على كفاءة تلك الرقاقة .

1 – 11 – 2 الخطوة 2: تهيئة سطح الخلية Texturing

بعد الفحص المسبق الأولي ، يتم تشكيل السطح الأمامي textured لرقائق السيليكون لتقليل فقد انعكاس الضوء الساقط . (38 , 26)



Light reflection difference between a non-textured flat silicon wafer surface and a silicon wafer surface with a random pyramid texture

بالنسبة لرقائق السيليكون أحادية البلورية mono-crystalline silicon wafers ، فإن التقنية الأكثر شيوعًا هي التركيب الهرمي العشوائي الذي يتضمن تغطية السطح بهياكل هرمية متجهة لأعلى .

يتم تحقيق ذلك عن طريق الحفر والإشارة إلى الأعلى من السطح الأمامي . المحاذاة الصحيحة للأهرامات المحفورة هي نتيجة للتركيب الذري المنتظم والأنيق للسيليكون أحادي البلورية .

كما أن التركيب الذري المنتظم والأنيق للسيليكون أحادي البلورية يفيد أيضًا في تدفق الإلكترونات عبر الخلية مع عدد أقل من الحدود تتدفق الإلكترونات بشكل أفضل لذلك ، يتمتع السيليكون أحادي البلورية بميزة هيكلية كهروكيميائية توفر مزيدًا من الكفاءة على السيليكون متعدد البلورات Multi-crystalline silicon .

الآن ، مع وجود مثل هذا الهيكل الهرمي في مكانه ، لا ينعكس الضوء الساقط للخلف ويضيع في الهواء المحيط ولكنه يرتد مرة أخرى على السطح .

تقنية التركيب الأخرى الأقل شيوعًا هي التركيب الهرمي المقلوب . بدلاً من توجيه الأهرامات لأعلى من السطح الأمامي ، يتم حفر الأهرامات في سطح الرقاقة ، مما يؤدي بالمثل إلى تقليل خسائر الانعكاس للضوء الساقط المحاصر في ثقوب الهرم المقلوبة .

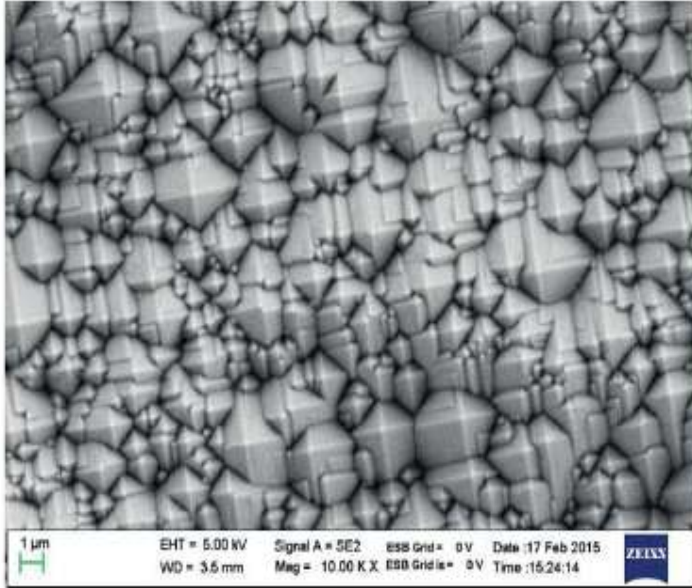
يتطلب تشكيل سطح رقائق السيليكون متعددة البلورات multi-crystalline silicon wafer's surface الطباعة الحجرية الضوئية والتي يطلق عليها photolithography وهي تقنية تتضمن نقش شكل هندسي على ركيزة substrate باستخدام الضوء , أو القطع الميكانيكي للسطح بالليزرأو المناشير الخاصة .

تشكيل سطح الرقائق السيليكونية أحادية البلورة Texturing of mono-crystalline Si- wafers

بدأ تطوير الخلايا الشمسية بشكل أساسي باستخدام الرقائق أحادية البلورة ، و يستخدم النقش القلوي Alkaline etching متباين الخواص على أساس (KOH / NaOH) للتركيب الهرمي للرقائق أحادية البلورة . الرقاقة أحادية البلورية المقطوعة لها انعكاس متوسط مرجح يزيد عن 30٪ (أكثر من الطول الموجي 300–1200 نانومتر) مما يقلل إلى 11-12٪ بعد عملية التشكيل texturing .(39,9) يظهر الشكل النموذجي لسطح قلوي محفور في الشكل أدناه (39) . يحفر محلول النقش متباين الخواص سطح الرقاقة ,ينتج عن هذا تكوين هياكل هرمية عشوائية تشكل زاوية 54.7 درجة بالنسبة لسطح الرقاقة.

تظهر الخواص النموذجية لعملية التركيب القلوي في الجدول أدناه (39,9) . وتجدر الإشارة إلى أن قيم الخواص المختلفة إرشادية ولا يجب اعتبارها مطلقة نظرًا لوجود مجموعة متنوعة من الشركات المصنعة للمواد المضافة في السوق . تم استخدام كحول الأيزوبروبيل (IPA) في البداية كمادة مضافة في محلول التركيب ، والذي لا يشارك في تفاعل النقش Etching reaction .

ولكنه يعمل كعامل ترطيب لتحسين تجانس عملية التركيب عن طريق منع فقاعات H2 (الناتجة أثناء التفاعل) الالتصاق على سطح السيليكون . ومع ذلك ، تم استبدال IPA تدريجيًا بمضافات بديلة additive بسبب عيوب مثل التركيز غير المستقر حيث أن درجة حرارة الترطيب بالكحول قريبة من نقطة غليان IPA (وهي 82.4 درجة مئوية) ، والتكاليف المرتفعة ، والاستهلاك المرتفع ، والمخاطر الصحية والقابلية للانفجار . نشرت العديد من البحوث لتطوير استبدال IPA بإضافات بديلة additive للتغلب على عيوب IPA ، وتقليل انعكاس السطح . تقلل الإضافات أيضًا من وقت المعالجة إلى أقل من 10 دقائق و تزيد من عمر الترطيب إلى اكثر من 100 مرة .



Typical surface morphology of an alkaline textured mono-crystalline wafer.

Process	KOH/IPA	KOH/additive
KOH (%)	3	<3
IPA (%)	6	—
Additive (%)	—	<2
Process temperature [°C]	>80	70–100
Pyramid size [µm]	5–12	2–7
Process time [min]	30–40	5–10
Organic content [wt%]	4–10	<1.0
Boiling point [°C]	83	>100
Bath lifetimes	<15	>100

Table
Process parameters for IPA-based and additive-based alkaline texturing of mono-crystalline wafers.

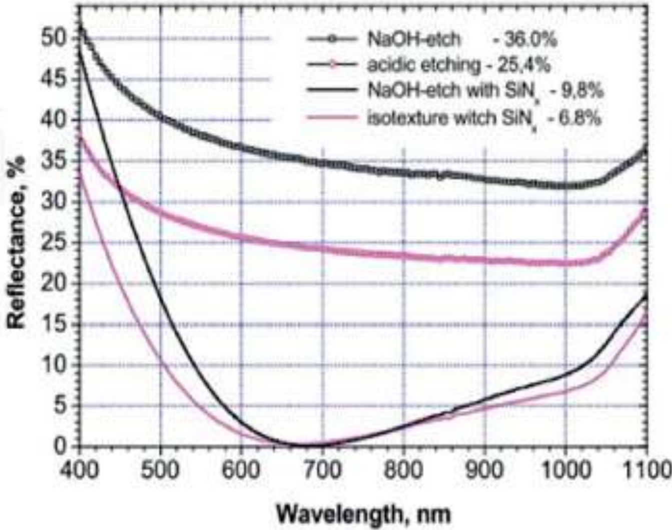
عادة ما يتم إجراء عملية تشكيل السطح Texturing للرقائق أحادية البلورة في "دفعة" مما يعني أن الرقائق يتم تحميلها في ناقل مع فتحات لتثبيت الرقائق (100 فتحة في ناقل) ثم تتم معالجة الدُفعة بالتتابع في حمام المعالجة من أجل التركيب والتنظيف وخطوات المعالجة لإزالة المخلفات العضوية والتلوث المعدني وتجفيف الرقاقات المعالجة . يظهر شكل الناقل النموذجي لرقائق أحادية البلورة في الشكل أدناه (39,9) .



Carriers for loading wafers in the batch tool. Source: RCT solutions GmbH.

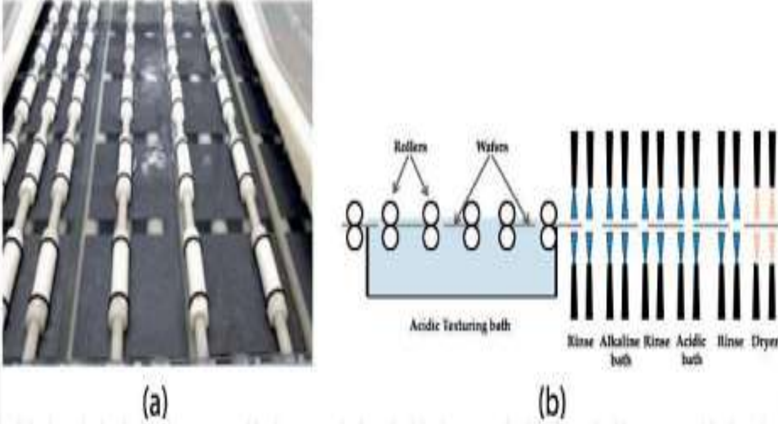
تشكيل سطح رقاقات السيليكون متعددة البلورات Texturing of multi-crystalline silicon wafers

توفر الرقائق متعددة البلورات ميزة التكلفة مقارنةً بالرقائق أحادية البلورة ، وبالتالي تم اعتمادها على نطاق واسع . ومع ذلك ، فإن الكيمياء القلوية المستخدمة في تشكيل سطح الرقائق أحادية البلورة لا تعمل بشكل جيد للرقائق متعددة البلورات بسبب وجود اتجاهات مختلفة للجزيئات . تم تطوير كيمياء حمضية بديلة تعتمد على HF و HNO3 لإزالة تلف المنشار و تشكيل سطح الرقائق متعددة البلورات في وقت واحد . يعمل التشكيل texturing المعتمد على المحلول الحمضي acidic etching في درجات حرارة أقل من درجة حرارة الغرفة ، وبالتالي يؤدي إلى تقليل انبعاث غاز التفاعل ، وتوليد حرارة أقل ، وثبات أعلى لمحلول الحفر وتحكم أفضل في معدل الحفر . يوضح الشكل أدناه مقارنة بين التركيب القلوي وعملية التركيب الحمضي للرقائق متعددة البلورات . (40,9)



Comparison of alkaline and acidic texturing for multi-crystalline wafers. Reflectance curves after deposition of SiN_x:H are also showed for comparison

يمكن إجراء عملية التركيب الحمضي للرقاقة متعددة البلورات في وقت أقل بكثير مقارنة بعملية التركيب القلوي ، حيث يتم تمرير الرقاقات عبر بكرات مغمورة في حمام النقش Etching bath . صورة تمثيلية لعملية مضمنة مع عملية التركيب الحمضية النموذجية موضحة في الشكل أدناه .(9)



(a) Representative inline process with five lanes and (b) acidic texturing process flow for multi-crystalline wafers.

من المهم ملاحظة أن سطح الرقاقة المتجه لأسفل في محلول النقش محفور بشكل أفضل من الجانب العلوي وهو "الجانب المشمس" لمزيد من المعالجة . تؤدي عملية التركيب الحمضي إلى تكوين سيليكون مسامي على السطح المحفور يمتص الضوء ويزيد أيضًا من إعادة تركيب السطح . ومن ثم يتم إزالة السيليكون المسامي باستخدام محلول قلوي مخفف . بعد ذلك ، يتم إجراء التنظيف الحمضي (HF + HCl) لإزالة الأكاسيد والتلوث المعدني من أسطح الرقاقة .

من المهم ملاحظة أن عملية التركيب الحمضية , التي تمت مناقشتها أعلاه , مناسبة للرقائق متعددة البلورات multi-crystalline wafers المنشورة بأسلاك (SWS) Slurry Wire Sawing . و حلت عملية النشر بالأسلاك الماسية (DWS) Diamond Wire Sawing محل القطع القائم على سلك (SWS) بسبب العملية والمزايا الاقتصادية . إن ضرر المنشار SWS للرقائق متعددة البلورات أكبر من ضرر منشار DWS ، التي تحتوي على أخاديد عميقة مستقيمة وسطح أكثر نعومة من رقائق المنشار SWS . يلعب تلف المنشار SWS للرقائق دورًا مهمًا في بدءعملية التركيب recombination ، والتي لا تحدث للرقائق عند أستخدام DWS .(40).

1 – 11 – 3 الخطوة الثالثة : تنظيف الحمض Acid cleaning

بعد تشكيل سطح الرقائق السيليكونية ، تخضع الرقائق للشطف الحمضي (أو: التنظيف الحمضي) . في هذه الخطوة ، تتم إزالة أي بقايا جسيمات بعد التركيب من السطح . باستخدام بخار فلوريد الهيدروجين (HF) ، يمكن حفر طبقات السيليكون المؤكسدة على الركيزة بعيدًا عن سطح الرقاقة. والنتيجة هي سطح مبلل يمكن تجفيفه بسهولة . باستخدام كلوريد الهيدروجين (HCl) ، يمكن امتصاص البقايا المعدنية الموجودة على السطح بواسطة الكلوريد وبالتالي إزالتها من الرقاقة .(38)

1 – 11 – 4 الخطوة الرابعة : الانتشار Diffusion

الانتشار diffusion هو في الأساس عملية إضافة مادة شائبة dopant إلى رقاقة السيليكون لجعلها أكثر موصلية للكهرباء . هناك طريقتان أساسيتان للانتشار diffusion : إنتشار الحالة الصلبة solid-state diffusion و انتشار الباعث emitter diffusion . (38)

في حين أن الطريقة الأولى تتضمن أساسًا التشويب المنتظم uniform doping الذي سبق ذكره للرقائق مع المواد من النوع p و n ، يشير انتشار الباعث emitter diffusion إلى وضع طبقة رقيقة تحتوي على مادة شائبة doping material على الرقاقة بواسطة فرن الطلاء بالإنتشار diffusion coating furnace .

الرقاقات التي تم تشويبها مسبقًا بالبورون من النوع p أثناء عملية الصب , أثناء عملية الانتشار تعطى سطح سالب negative surface (من النوع n) عن طريق تشويبها بمصدر فوسفور P عند درجة حرارة عالية ، مما يؤدي إلى تكوين وصلة السالب –الموجب (p-n junction) .

هذه الوصلة لنقص الإلكترون في النوع p المشوبة بالبورون و الغنية بالفجوات الموجبة , وتركيز الإلكترون العالي في النوع n المشوبة بعنصرالفسفور يسمح للإلكترونات الزائدة من النوع n بالمرور إلى النوع p ، وهو تدفق يخلق مجالًا إلكترونيًا عند الوصلة p-n junction .

عملية انتشار الحالة الصلبة solid state diffusion وهي عملية مباشرة و طريقة نموذجية لإدخال ذرات شائبة dopant atoms في أشباه الموصلات .

في معالجة الخلايا الشمسية السليكونية ، عادة ما تكون الركائز substrate الأولية مشوبة بشكل موحد مع البورون الذي يعطي قاعدة من النوع p . و تتكون طبقة الباعث emitter من النوع n من خلال التشويب بالفوسفور .

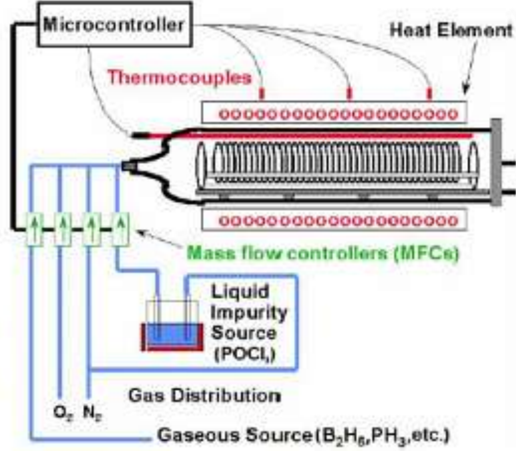
عملية انتشار اوكسيكلوريد الفسفور $POCl_3$ diffusion process طريقة شائعة لإنشاء وصلة pn-junction لخلايا السيليكون الشمسية .كما في الشكل التالي (11,9)

Diffusion furnace: horizontal



Temperature control in 3 to 5 zones by spike thermocouples.

Diffusion tube and boat made from SiO_2, SiC...



Horizontal furnaces were the diffusion work horses up to 200 mm wafers

17

يمكن أن تُعزى شعبية انتشار طريقة التشويب POCl3 إلى التكاليف المنخفضة ، والاستقرار الجيد ، والبساطة النسبية ، والإنتاجية العالية لمعدات الإنتاج المتاحة.

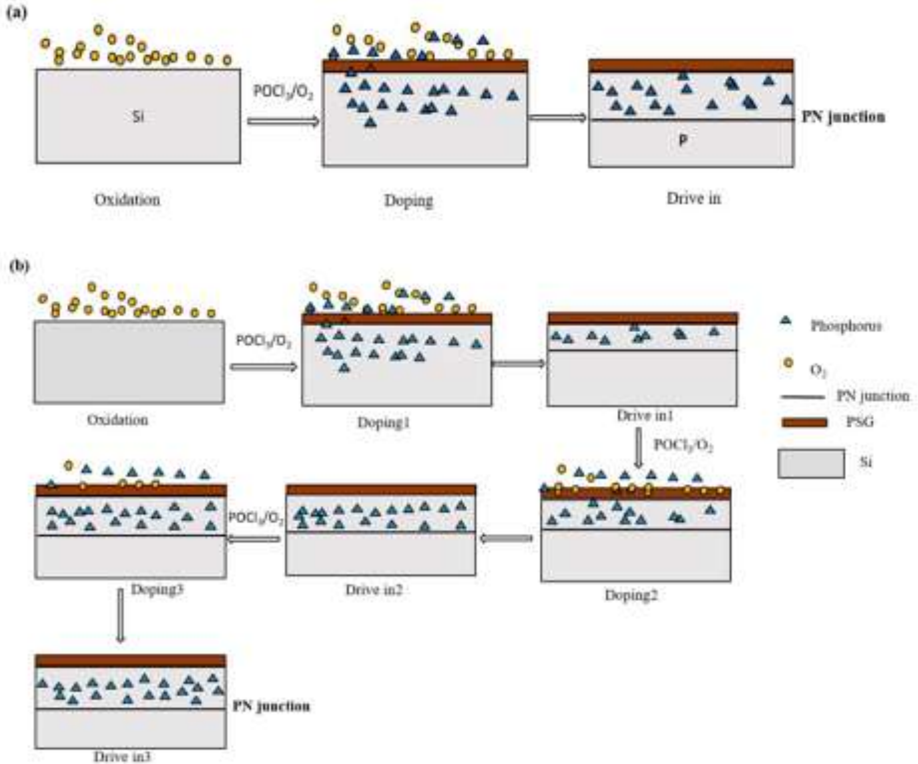
تمت دراسة عملية POCl3 على نطاق واسع من قبل مجموعات بحثية مختلفة. عندما تم استخدام انتشار الفوسفور في البداية في تصنيع الخلايا الشمسية Si ، تم استخدام مصادر P2O5 الصلبة كمصدر شائب . بعد ذلك ، تم إستخدام انتشار مصدر POCl3 السائل على نطاق واسع , نظرًا لتحكمه الأفضل وإنتاجيته الأعلى .

كانت عمليات الانتشار من خطوة واحدة شائعة حيث تم استخدام درجة حرارة واحدة وتدفق مستمر للغاز المخفف لكل من ترسيب زجاج فسفوسيليكات (PSG) ودفع الشوائب إلى العمق المطلوب . هذه عملية سريعة ولكنها تميل إلى إنشاء باعث مشوب doped emitter بشكل مفرط و بالتالي تدهور الأداء الكهربائي .(11,8)

بعد العملية المكونة من خطوة واحدة ، يتم إجراء أكسدة حرارية إضافية أحيانًا لدفع الشوائب إلى داخل السيليكون وتشكيل وصلة p-n junction أعمق .

يمكن أيضًا إجراء عملية POCl3 بطريقة من خطوتين : خطوة ترسيب PSG متبوعة بخطوة قيادة (يحتمل أن تكون عند درجات حرارة مختلفة) .

أثناء العملية ، يُسمح بغاز POCl3 فقط في خطوة ترسيب PSG ، وبعد ذلك يتم نقل الشوائب بشكل أعمق من PSG إلى ركيزة السيليكون في خطوة القيادة .(11,8)



يمكن تقسيم انتشار $POCl_3$ التقليدي المكون من خطوتين على مرحلتين: ترسب طبقة PSG و محرك لتحريك الفوسفور إلى عمق أكبر في السيليكون .

يعد انتشار الباعث emitter diffusion أحد الخطوات الحرارية الحاسمة في تصنيع الخلايا الشمسية الصناعية . يتكون الباعث من النوع n لخلايا السيليكون الشمسية من النوع p البلوري عن طريق انتشار الفوسفور (P) . في عملية الانتشار ، يتم إرسال رقائق السيليكون Si الى الفرن وتعريضها عند 800 - 900 درجة مئوية لكلوريد الفوسفوريل ($POCl_3$) و الأكسجين O_2 مما يؤدي إلى ترسب PSG على أسطح رقاقة السيليكون Si . تسمى هذه الخطوة بالترسيب المسبق ، حيث يعمل PSG كمصدر لمادة الفوسفور (P) لتنتشر في رقاقة السيليكون Si .

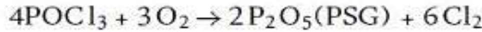
الخطوة التالية هي القيادة drive-in ، حيث يتم فصل إمداد الغازات الشائبة وينتشر P من طبقة PSG بشكل أكبر في رقاقة Si .

يجب مراعاة ثلاثة تأثيرات مختلفة . أولاً ، انتشار الفسفور P من PSG و وجوده في الحالات النشطة كهربائيًا و غير النشطة في رقاقة Si .

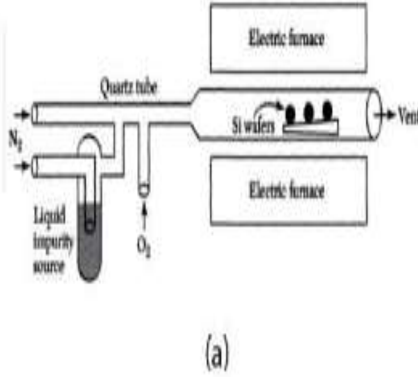
ثانياً ، دخول الشوائب إلى طبقة السيليكون Si من طبقة PSG . و أخيرًا ، يسحب تكوين التلامس المعدني metal contact formation مع باعث السيليكون المشوب بالفسفور (P-doped Si emitter) الطاقة المتولدة .

يتم قياس عملية الانتشار بواسطة مقاومة الألواح التي تعتمد على عمق وصلة p-n junction و تركيز الفسفور P .

وتجدر الإشارة إلى أن عملية الانتشار تحدث في الجانب الأمامي FS (المعرضة مباشرة للغازات) وكذلك على الحواف و الجانب الخلفي RS . إذا لم يتم تنفيذ عملية عزل الحواف فسيكون الباعث دائرة قصر short-circuit مع الركيزة . يوضح الشكل التالي عملية انتشار $POCl_3$ في نظام أنبوب كوارتز مغلق , $POCl_3$ هو مصدر سائل يتم توفيره لأنبوب العملية بغمره بغاز N_2 , عن طريق خلط O_2 مع $POCl_3$, كما موضح في الشكل الأتي (11) ، سيكون هناك نمو لطبقة PSG , كما هو موضح في المعادلة :



$$4POCl_3 + 3O_2 \rightarrow 2P_2O_5(PSG) + 6Cl_2$$



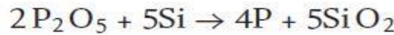
(a)



(b)

(a) Schematic representation of the batch-type diffusion process and (b) representative image of a batch-type diffusion equipment. Source: centrotherm GmbH.

على سطح السيليكون Si ، يتم تحويل $2P_2O_5$ إلى عنصر الفوسفور أثناء خطوة القيادة drive-in step كما هو موضح في المعادلة : (11)



$$2P_2O_5 + 5Si \rightarrow 4P + 5SiO_2$$

يستخدم PSG كمصدر للقيادة drive-in في ذرات الفسفور P إلى سطح السيليكون Si . أثناء عملية القيادة drive-in process ، يتم إيقاف $POCl_3$ ويتم إضافة فقط O_2 لبناء طبقة أكسيد رقيقة أسفل PSG لتعزيز انتشار ذرات الفسفور P في سطح السيليكون Si .

يوجد داخل أنبوب الانتشار خمس مناطق تسخين كما هو موضح في الشكل التالي .

المناطق هي : (9)

- **منطقة التحميل (Loading zone (LZ - المنطقة التي يتم تحميل الرقاقات منها في الأنبوب.**
- **منطقة التحميل المركزية (Center loading zone (CLZ - المنطقة الواقعة بين منطقة التحميل والمنطقة المركزية.**
- **منطقة المركز (Center zone (CZ - منطقة مركز الأنبوب.**
- **منطقة الغاز المركزية (Center gas zone (CGZ - المنطقة الواقعة بين منطقة المركز ومنطقة الغاز.**
- **منطقة الغاز (Gas zone (GZ - المنطقة التي تخرج منها الغازات عبر العادم.**

عادةً ما يتم ضبط درجات حرارة كل منطقة تسخين للحصول على مقاومة emitter sheet resistance متساوية لجميع الرقاقات . كما في الشكل التالي (9)



Heating zones inside the diffusion tube.

يجب أن تكون بيئة عملية الانتشار نظيفة للغاية وبالتالي يتم استخدام مادة الكوارتز للأنابيب . تؤثر أيضًا نظافة الأنابيب وصيانة منطقة التحميل على نتائج العملية. نظرًا لعدم وجود بقايا في الأنبوب في انتشار الطور الغازي ، فإنه ينتج عنه عملية أنظف . التحميل في ظروف الضغط المنخفض (LP) يمكن زيادة الإنتاجية . عادةً ما يتم تحميل 1000 رقاقة في أنبوب واحد وبخمسة أنابيب انتشار في نظام نشر من نوع الدُفعات .

كما تم استخدام نظام الانتشار المضمن inline diffusion system حيث يتم نقل الرقاقات على حزام مع حمض الفوسفوريك كمصدر لمواد التشويب بالفسفور P dopants في الإنتاج التجاري . ومع ذلك ، بالمقارنة مع العملية المضمنة ، فإن عملية الدُفعات أكثر نظافة وفعالية وكفاءة .

بالنسبة للخلايا الشمسية من النوع n أو مفاهيم الخلايا الشمسية المتقدمة مثل PERT ، يعتمد انتشار الدُفعات من النوع p على مصادر البورون (B) المشبعة مثل ثلاثي بروميد البورون (BBr_3) .

1 – 11 – 5 الخطوة الخامسة : الحفر وعزل الحواف Etching & Edge Isolation

أثناء عملية الانتشار ، ينتشر الفوسفور من النوع n ليس فقط في سطح الرقاقة المطلوب تشويبها , ولكن أيضًا حول حواف الرقاقة وكذلك على الجانب الخلفي ، مما يخلق مسارًا كهربائيًا بين السطح الأمامي والخلفي للرقائق وبهذه الطريقة يمنع العزل الكهربائي بين جانبي الرقاقة وهذا أمر سلبي . الهدف من عملية الحفر وعزل الحواف هو إزالة هذا المسار الكهربائي حول حافة الرقاقة بواسطة تكديس أقراص الخلايا فوق بعضها البعض , ثم تعريضها إلى غرفة الحفر بالبلازما plasma etching chamber باستخدام رباعي فلورو الميثان (CF_4) لحفر الحواف المعرضة .

1 – 11 – 6 الخطوة السادسة : غسل ما بعد الحفر Post-Etching Washing

بعد الحفر ، تبقى إمكانية وجود بقايا الجسيمات على الرقاقة وحوافها . لذلك تحتاج الرقاقات إلى الغسيل الثاني لإزالة بقايا عملية الحفر السابقة . بعد هذا الغسيل الثاني ، يمكن معالجة الرقائق أيضًا بترسيب الطلاء المضاد للانعكاس anti-reflective coating (ARC) .

1 – 11 – 7 الخطوة السابعة : ترسيب طلاء مضاد للانعكاس Anti-Reflective Coating Deposition

بالإضافة إلى تشكيل سطح الرقائق surface texturing ، غالبًا ما يتم طلاء السطح بطبقة مضادة للإنعكاس ARC لتقليل الانعكاس وزيادة كمية الضوء الممتص في الخلية .

يعكس سطح السيليكون Si العاري أكثر من 30٪ من الضوء الساقط . تعمل عملية التشكيل texturing على تحسين التقاط الضوء . من المستحسن تقليل الانعكاس الذي يتم الحصول عليه عن طريق ترسيب طبقة ARC .

كانت TiOx واحدة من أقدم المواد التي تم استخدامها كطبقة ARC للخلايا الشمسية ، ولكن نظرًا لعدم قدرتها على توفير تخميل passivation سطحي مناسب ، تم استبدالها في النهاية بـ SiNx: H .

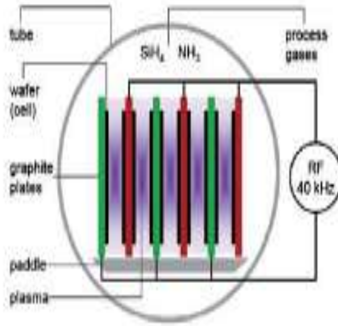
كما تم استخدام أكسيد السيليكون المنضج حرارياً (SiO2) thermally grown silicon oxide أيضًا كمادة تخميل passivation material في خلايا الباعث الخلفية المنتشرة موقعياً (PERL) passivation emitter rear locally . جعلت المعالجة الحرارية العالية و وقت المعالجة الطويل التخميل القائم على SiO2 غير مناسب للإنتاج الضخم للخلايا الشمسية .

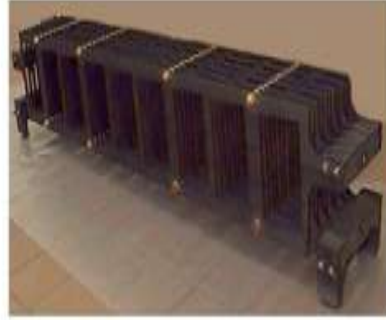
عملية ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما (PECVD) مناسبة لترسيب طبقة ARC من SiNx: H والتي لا تقلل الانعكاس فحسب ، بل تخمل أيضًا باعث الجانب الأمامي من النوع n passivated front-side n- type emitter وبالتالي تحسين كفاءة الخلايا الشمسية .

يظهر الشكل التخطيطي لنظام PECVD من نوع الدُفعات Batch- type في الشكل التالي (38) . يتم تحميل الرقاقات في حافظة من الجرافيت مع مواجهة الجوانب الأمامية لبعضها البعض . تقوم بلازما التردد الراديوي RF plasma على أساس غازات الأمونيا (NH3) و السيلان (SiH4) التي تعمل عند درجة حرارة 400-450 درجة مئوية بترسيب طبقة SiNx: H المهدرجة حسب المعادلة التالية .(38)



$$3SiH_4 + 2NH_3 + N_2 \rightarrow Si_3N_4 + 9H_2$$





(a) (b)

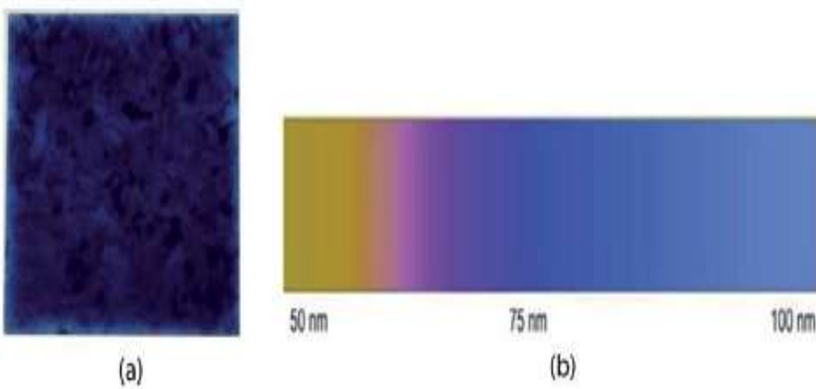
(a) Schematic diagram of batch-type PECVD process for SiN_x:H deposition and (b) graphite boat for loading Si wafers in the PECVD furnace.

يتم التحكم في معامل الانكسار (RI) لغشاء SiNx: H بواسطة نسبة غاز SiH4 / NH3 ، بينما تعتمد السماكة على مدة الترسيب . يمكن لـ ARC المستندة إلى SiNx:H تقليل الانعكاس لطول موجة واحد .

بالنسبة للخلايا الشمسية ، يتم اختيار RI والسمك لتقليل الانعكاس عند طول موجة يبلغ 600 نانومتر حيث إنها ذروة الطيف الشمسي . السماكة النموذجية لـ ARC SiNx: H هي 80-85 نانومتر مع (RI 2.0-2.1) مما يعطي الخلية الشمسية لونًا من الأزرق إلى الأزرق البنفسجي .

من المهم ملاحظة إن نسيج السطح surface texture و لون ARC يعتمد على خصائص الترسيب المحددة . هناك مجموعة متنوعة من الوحدات الشمسية حيث يكون لون الخلايا الشمسية أغمق على عكس اللون الأزرق النموذجي .

يظهر الشكل التالي (a) صورة تمثيلية لخلية شمسية متعددة البلورات مع SiNx: H ، بينما يظهر تباين لون SiNx: H بناءً على سمكها في الشكل (b) . (38)



(a) Representative image of SiN_x:H coated multi-crystalline solar cell, (b) variation of SiN_x:H layer based on its thickness.

أن طبقة (SiNx:H) غير مناسب لتخميل السيليكون من نوع p (p-type Si) وبالتالي تستخدم عوازل كهربائية مثل أكسيد الألمنيوم Al_2O_3 لتخميل الجانب الخلفي RS لبنية الخلية مثل خلايا الـ PERC أو للبواعث من النوع p في الخلايا الشمسية من النوع n (p-type emitters in n-type solar cells) .

في صناعة أشباه الموصلات ، هناك ثلاث طرق أساسية لترسيب الطبقات الرقيقة على الرقائق السيليكونية ، وهي :

ترسيب البخار كيميائي منخفض الضغط Low Pressure Chemical Vapor Deposition LPCVD

ترسب بخار كيميائي منخفض الضغط (LPCVD) عبارة عن تقنية ترسيب بخار كيميائي تستخدم الحرارة لبدء تفاعل غاز المواد الأولية على الركيزة الصلبة (Solid substrate) هذا التفاعل على السطح هو ما يشكل مادة الطور الصلب (solid phase material) . يستخدم الضغط المنخفض (LP) لتقليل أي تفاعلات طور غاز غير مرغوب فيه ، وكذلك يزيد من الانتظام عبر الركيزة . يتضمن عملية الترسيب التي يجب إجراؤها في أفران الأنبوب و تتطلب درجات حرارة عالية .

ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition PECVD

ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما (PECVD) هو عملية ترسيب بخار كيميائي تستخدم لترسيب أغشية رقيقة من حالة غازية (بخار) إلى حالة صلبة على ركيزة substrate . تدخل التفاعلات الكيميائية في العملية ، والتي تحدث بعد تكوين بلازما الغازات المتفاعلة. يتم إنشاء البلازما بشكل عام عن طريق تردد الراديو (RF) (التيار المتردد (AC)) أو تفريغ التيار المباشر (DC) بين قطبين ، يتم ملء الفراغ بينهما بالغازات المتفاعلة . وهي الطريقة الأكثر شيوعًا لترسيب طلاء AR على سطح الرقاقة . في عملية PECVD ، يوجد الغلاف الرقيق في حالة غازية و من خلال عملية تفاعل كيميائي تتصلب على سطح الرقاقة .

ترسيب البخار الكيميائي بالضغط الجوي Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition APCVD

طريقة توليف حيث تتعرض الركيزة لواحد أو أكثر من المواد المتطايرة ، عند الضغط الجوي ، والتي تتفاعل أو تتحلل على السطح لإنتاج رواسب . يوفر ترسيب البخار الكيميائي بالضغط الجوي حلاً وسطًا بين الكفاءة وإمكانية التحكم والتشغيل الممتاز للتكرار في تغطية الأغشية الرقيقة على الركائز.

تكون الكفاءة والجودة أعلى بشكل عام من تفاعلات المرحلة السائلة بسبب التحكم الممتاز في السطح بين الغشاء والركيزة . يستخدم فقط في عدد قليل من التطبيقات ويتطلب درجات حرارة عالية .

1 – 11 – 8 الخطوة الثامنة : طبع الموصلات و التجفيف Contact Printing and Drying

في الخطوة التالية ، تتم طباعة خطوط معدنية metal inlines على سطح الرقاقة بهدف إنشاء موصلات أومية ohmic contacts . تتم طباعة هذه الخطوط المعدنية على الجانب الخلفي من الرقاقة ، وهو ما يسمى الطباعة الخلفية backside printing .

يتم تحقيق ذلك من خلال طباعة المعاجين المعدنية metal pastes بأجهزة طباعة سطحية خاصة screen printing تضع هذه الخطوط المعدنية على الجانب الخلفي . بعد الطباعة ، تخضع الرقاقة لعملية تجفيف drying process . بمجرد أن تجف ، تتبع هذه العملية طباعة الموصلات على الجانب الأمامي ، ثم تجفف الرقاقة مرة أخرى .

طباعة السطح القائم على المعدن Screen-printing-based metallization

خطوة المعالجة الأخيرة لتصنيع الخلايا الشمسية هي معالجة الجانب الأمامي FS و الجانب الخلفي RS لاستخراج الطاقة بأقل خسائر مقاومة . الفضة Ag هي مادة توصيل جيدة للباعث emitter من النوع n ، بينما يقوم الألمنيوم Al بعمل توصيل جيد جدًا مع الركيزة من النوع p . يتم استخدام مزيج من عجينة معدنية Ag / Al لطباعة توصيلات pads على الجانب الخلفي RS لتسهيل الترابط بين الخلايا الشمسية في اللوح الشمسي . تمثيل تخطيطي لعملية طباعة السطح في الشكل التالي : (38)

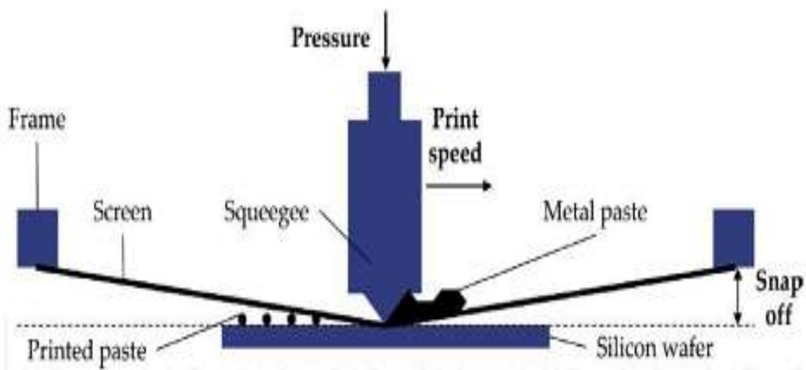
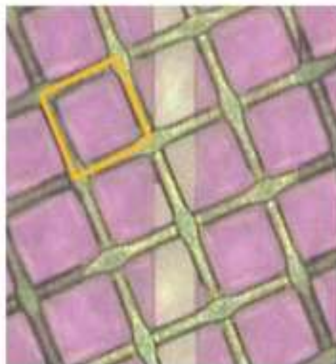
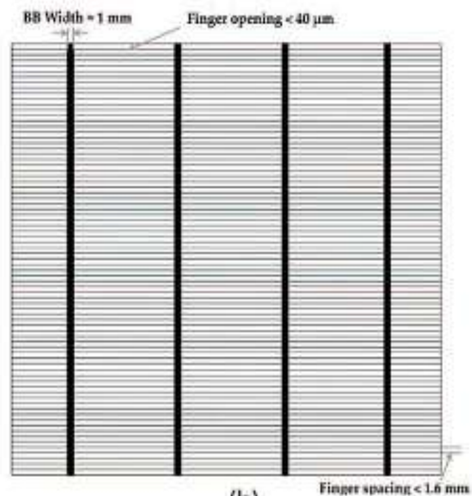


Illustration of the screen-printing process for solar cell metallization.



(a)



(b)

(a) Mesh-emulsion screen with finger opening for FS Ag printing [40] and (b) representative FS metallization pattern.

ينتشر المعجون المعدني metal paste على السطح عبر الغمر flood في عملية تسمى حركة الممسحة squeegee movement التي ترسب العجينة المعدنية على الخلية بناءً على نمط السطح screen-pattern .

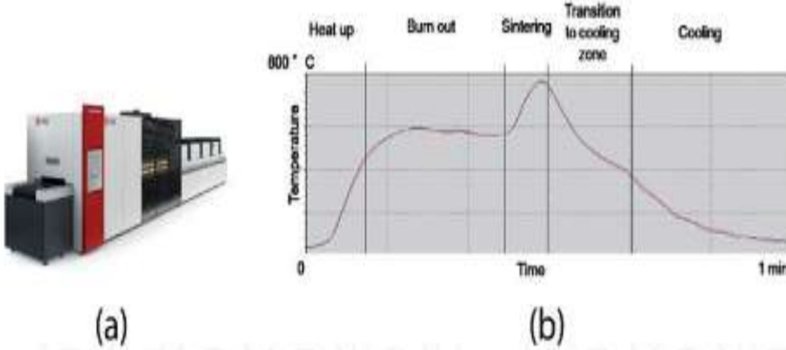
يتم وضع عجينة معدنية نموذجية لموصلات الفضة/ألمنيوم للجانب الخلفي (Ag / Al - RS) ، أو موصلات ألمنيوم (RS- Al) و موصلات فضة للجانب الامامي (FS- Ag) .

مع خاصية السطح هذه و وضع معجون معدني جيد ، يجب الحصول على معامل ملئ (Fill-Factor FF) ثابت بنسبة أكبر من 80 ٪ للخلايا الشمسية Al-BSF مع فقدان تظليل ضوئي بنسبة أقل من 6 ٪ .

التجفيف و الحرق السريع للمعاجين المعدنية Drying and fast Firing of Metallization pastes

تتكون المعاجين المعدنية من مسحوق معدني ومذيبات ومواد رابطة عضوية . في حالة عجينة الفضة للجانب الأمامي (FS Ag-paste) ، تحتوي العجينة المعدنية أيضًا على زجاج glass-frit عندها يحفر طبقة الـ (SiNx: H) و يتلامس مع الباعث من النوع n (n-type emitter) .

يتم تجفيف المعاجين المعدنية بعد الطباعة ، ويتم إرسالها الى فرن الحرق السريع (fast-firing furnace) للتلبيد sintering و تشكيل توصيلات الالمنيوم للجانب الخلفي (RS Al- BSF) و موصلات الفضة للجانب الأمامي (FS Ag-contact) . يوضح الشكل أدناه مثالاً على فرن الحرق السريع مع ملف تعريف درجة الحرارة . (9)



(a) Example of a firing furnace for sintering metal contacts and (b) illustrative temperature profile of a firing furnace. Source: centrotherm GmbH.

ويوضح الشكل التالي عملية تلبيد إصبع الفضة للجانب الأمامي (**FS Ag-finger**) .(9)

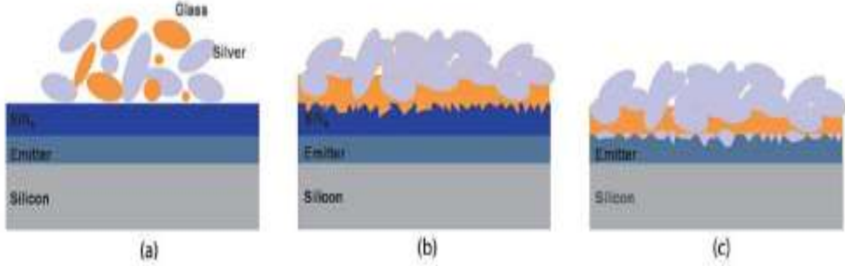
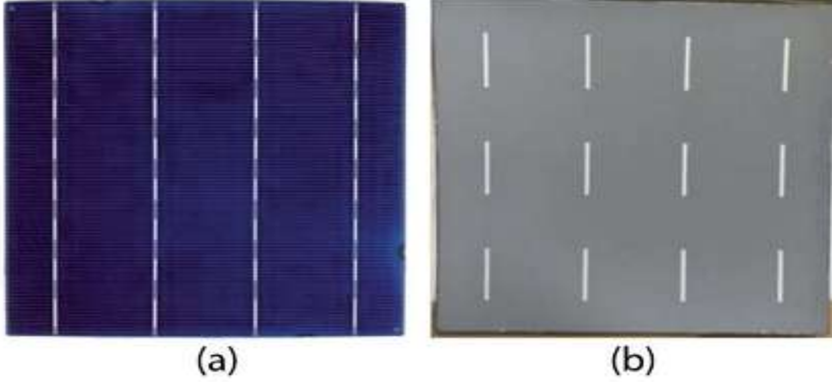


Illustration of the firing process. (a) Burning out of the organic binders, (b) melting of glass frit which etches the SiN_x:H and (c) Ag crystallite formation at the emitter interface.

عندما تمر الخلية الشمسية عبر فرن الحرق السريع ، يتم حرق المواد العضوية ، وتتبعها عملية صهر مزيج الزجاج **glass-frit** و أخيراً تكوين بلورات الفضة **Ag** التي تلامس الباعث من النوع **n** . يجب ضبط ملف الحرق بناءً على أنواع معينة من المعاجين المعدنية و ملف انتشار الباعث .

على سبيل المثال ، يمكن أن تكون أعلى درجة حرارة حرق تكون منخفضة بالنسبة لتشكيل اتصالًا أوميًا جيدًا على الجانب الأمامي **FS** ، بينما يمكن أن تؤدي درجة الحرارة المرتفعة جدًا إلى انتشار الفضة **Ag-diffusion** خلال وصلة **p-n** و تحويل الوصلة (تغيير موقع وصلة **p-n**) .

يظهر الشكل التالي صورة لخلية شمسية Al-BSF متعددة البلورات كاملة . (14)



(a) FS of a complete solar cell and (b) RS of a complete solar cell.

الطلاء المعدني على الجانب الأمامي Plating-based front-side metallization

انخفضت تكلفة العوامل المختلفة في معالجة الخلايا الشمسية على مر السنين ، بينما لا تزال مساهمة موصلات الفضة Ag الأمامية هي الأكثر أهمية .

تم إنجاز قدر كبير من العمل لاستبدال الفضة Ag بمعدن بديل مثل النحاس (Cu) الذي له قيمة توصيل قريبة جدًا من الفضة Ag ، كما يوفر ميزة تكلفة كبيرة محتملة . يتميز النحاس بانتشار عالي و قابلية للذوبان في السيليكون Si وبالتالي يتم ترسيب طبقة حاجز مثل النيكل (Ni) على السيليكون Si قبل طلاء النحاس .

تتطلب عملية التعدين على الجانب الأمامي front-side metallization القائم على نيكل- نحاس Ni-Cu خطوة حفر إضافية لـ ARC في الجانب الأمامي على عكس التعدين القائم على عجينة الفضة Ag و في معظم الحالات أيضًا خطوة تلبيد sintering إضافية من النيكل Ni لتقليل مقاومة التلامس والحصول على التصاق جيد للموصل المعدني .

أدى التحسين المستمر في معاجين الفضة Ag للجانب الأمامي FS جنبًا إلى جنب مع البساطة والموثوقية والإنتاجية العالية لعملية طباعة السطح إلى صعوبة التعدين القائم على نيكل – نحاس Ni-Cu based للتنافس مع التعدين القائم على الفضة Ag للجانب الأمامي FS .

بعد أن تمت طباعة الموصلات المعدنية على الجانبين الخلفي rear side و الأمامي front side ، و تم تمرير الرقائق المطبوعة عبر فرن التلبيد sintering furnace لتصلب المعاجين المعدنية الجافة على الرقائق . بعد ذلك ، يتم تبريد الرقائق ويمكن بالفعل تسميتها بالخلايا الشمسية .

1 – 11 – 9 الخطوة التاسعة : الاختبار و فرز الخلايا Testing and Cell Sorting

في هذه العملية النهائية ، يتم اختبار الخلايا الشمسية الجاهزة للتجميع تحت ظروف محاكاة لأشعة الشمس ثم يتم تصنيفها وفرزها وفقًا لكفاءتها . يتم التعامل مع هذا بواسطة جهاز اختبار الخلايا الشمسية الذي يقوم تلقائيًا بالاختبار . ثم تصبح الخلية الشمسية أساسًا مادة خام جديدة تُستخدم بعد ذلك في تجميع الوحدات الكهروضوئية الشمسية . اعتمادًا على سلاسة عملية الإنتاج وجودة مادة رقاقة السيليكون الأساسية ، يتم بعد ذلك تصنيف النتيجة النهائية في شكل خلية شمسية إلى درجات مختلفة لجودة الخلايا الشمسية .

الفصل الثاني

فيزياء أشباه الموصلات

2 – 1 التركيب الذري لأشباه الموصلات

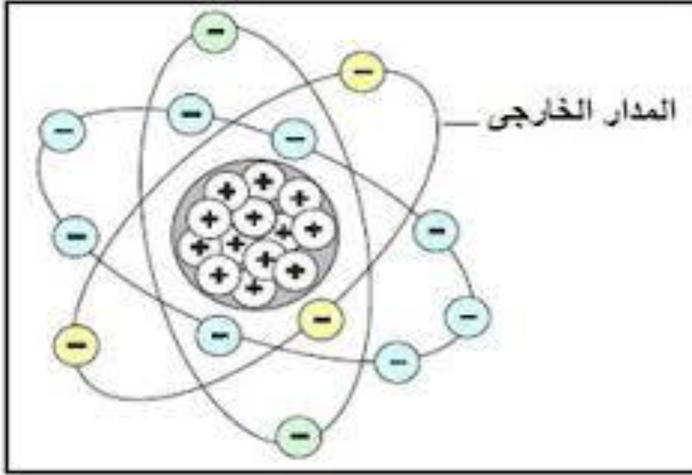
تصنف المواد الصلبة البلورية الى عناصر موصلة للكهرباء وعناصر شبه موصلة واخرى عازلة نسبة الى قابليتها لحمل التيار الكهربائي. وتنتظم ذرات هذه العناصر في صفوف منتظمة غالبا, حيث يكون التركيب البلوري لهذه الصفوف متشابه للابعاد الثلاثة ومن هذا الانتظام تتشكل وحدات او خلايا مكونة الشبكة البلورية. ان الالكترونات الخارجية لذرات المواد الصلبة مشتركة لجميع ذرات المادة, وهي حرة الحركة بين هذه الذرات في مجال واسع من درجات الحرارة. ان الكترونات الذرة الخارجية هذه تسمى الكترونات التكافؤ (valence electrons). ولها الدور الرئيسي في تحديد الخواص الفيزياوية والكيمياوية للمادة. وتميل المدارات الخارجية الحاوية على الكترونات تكافؤ ان تكون مشبعة.

ان المواد ذات التوصيل العالي عندها الكترون تكافؤ مستعد لان يكون حراً باستلامه طاقة بسيطة. اما المواد العازلة فهي ذات تركيب وتوزيع الكتروني تكون فيه الالكترونات مشدودة دائماً الى الذرات الام, ومن الصعوبة ان نجد الكترونات حرة في درجة الحرارة الاعتيادية. اما شبه الموصل فهو ليس موصل جيد ولا عازل جيد في درجات الحرارة الاعتيادية الا انه عازل في الدرجات الواطئة وموصل جيد في الدرجات العالية ومن امثلته عنصر السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) . (17)

2 – 2 مستويات الطاقة

يمتلك كل الكترون طاقة معينة ضمن المستوى الذي يدور فيه. واذا امتلك طاقة اضافية تجعل طاقته مساوية الى طاقة مستوى اخر فأنه يقفز اليه ويدور ضمنه. وتكون طاقة المستويات القريبة من النواة قليلة وتزيد عند الابتعاد عن النواة. اي ان الالكترون ذو الطاقة العالية يكون في المستويات البعيدة عن النواة. ولذا يكون اقل ارتباطاً بالنواة . ان هناك مناطق بين هذه المستويات خالية من وجود الالكترونات تسمى المناطق المحظورة (forbidden regions).

يتشبع المدار الاول بالكترونين فقط. اما المدار الثاني فأنه يتشبع بثمانية الكترونات والثالث يتشبع بثمانية عشر الكترون وهكذا وهي تتبع العلاقة ($2n^2$) حيث ان n هو رقم المدار . (17)
تنقسم جميع المدارات (عدا المدار الاول) الى مدارات ثانوية (subshells) وتحتوي على عدد من الالكترونات (عندما تكون مشبعة) كالاتي:
المدار الثانوي الاول = 2 الكترون, المدار الثانوي الثاني = 6 الكترون
المدار الثانوي الثالث = 10 الكترون, المدار الثانوي الرابع = 14 الكترون



تركيب الذرة (17)

ان الذي يعنينا في هذا الموضوع ليس المدارات الداخلية المشبعة وانما المدارات الخارجية غير المشبعة ويدعى هذا المدار بمدار التكافؤ (valence level) واما المدار الذي يليه والخالي من الالكترونات في درجة الصفر المطلق فهو مدار التوصيل (conduction level) وبين هذين المدارين هناك فجوة طاقة محظورة (forbidden energy gap).
يوجد في البلورة ملايين الذرات المتجاورة ولذلك فأن الالكترونات للذرات المتجاورة تتأثر ببعضها البعض وينتج عن هذا الارتباط اندماج مستويات الطاقة للذرات جميعا وتتكون حزمة مستويات طاقة بدلا عن مدارات منفردة. وبذلك ينتج حزمة من مستويات الطاقة تسمى حزمة التكافؤ (valence band) ونرمز لها بالرمز E_V وتكون الالكترونات ضمن هذه الحزمة مقيدة بالذرة ولا تشترك بالتوصيل الكهربائي وحين تحصل الكترونات التكافؤ على طاقة كافية تكون فيها متحررة من الارتباط بالذرة تقفز الى الحزمة التالية وهي حزمة التوصيل (conduction band) وسميت حزمة التوصيل لان الالكترونات المتواجدة فيها تشارك في عملية التوصيل الكهربائي ويرمز لها بالرمز E_C. وتوجد بين الحزمتين منطقة محظورة لا يوجد فيها مستويات طاقة.

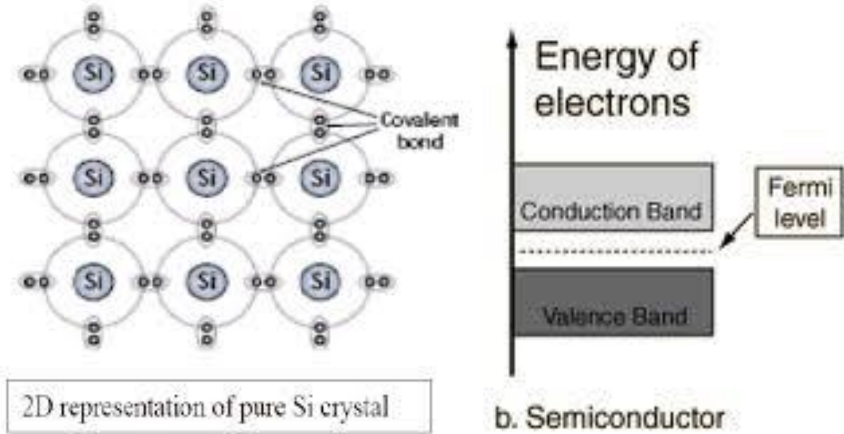
ان ذرات المواد الصلبة مترابطة فيما بينها بطرق عديدة فهي اما ان تفقد الكترون لينتقل الى ذرة اخرى او تكتسب الكترون من ذرة اخرى وطريقة الترابط هذه تدعى الاصرة الايونية (Ionic bond) بسبب تأين الذرات.
واما ان تشترك الذرات بعدد من الكترونات التكافؤ كما يحصل في المواد شبه الموصلة وهذا ما يسمى بالاصرة التساهمية (Covalent bond).
لقد اصطلح العلماء على تثبيت مستوي طاقة خاص يعتبر كمرجع تقاس على اساسه مستويات الطاقة الاخرى يسمى مستوى فيرمي (Fermi level) ويرمز له E_F . سيتم شرحه لاحقاً .

2 – 3 أنواع المواد الشبه موصلة

هناك نوعين من اشباه االموصلات, ذاتية (نقية) (intrinsic) ولاذاتية (غير نقية) (extrinsic).

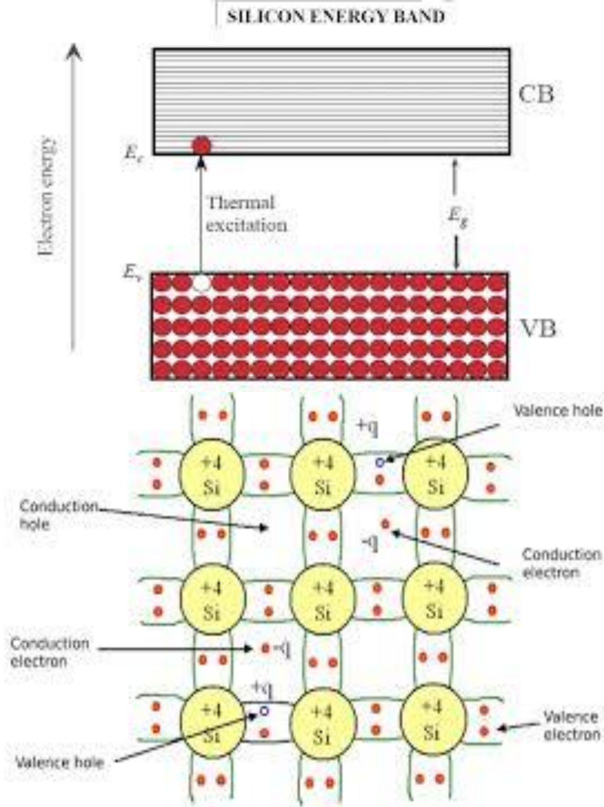
2 – 3 – 1 اشباه الموصلات (النقية) الذاتية (Intrinsic semiconductors)

تدعى اشباه الموصلات النقية والخالية من الشوائب والعيوب (في درجة الصفر المطلق) باشباه الموصلات الذاتية, مثل السيليكون والجرمانيوم, اللذان يقعان في المجموعة الرابعة من الجدول الدوري حيث انها تمتلك اربعة الكترونات في مدار التكافؤ. ولذلك فأن هذا المدار الخارجي يحتاج الى اربعة الكترونات اخرى لكي يتشبع وتكون الذرة في اقل طاقة ممكنة. ويحصل هذا عندما تساهم كل ذرة بأربع الكترونات مع اربع ذرات مجاورة (حيث هناك اربع ذرات متساوية البعد عن ذرة خامسة في المركز, اما بقية الذرات فبعيدة نسبياً) فتظهر كل ذرة وكأنها تمتلك ثمان الكترونات في مدارها الخارجي. وتدعى الاصرة بالاصرة التساهمية (covalent bond) مكونة الشبكة البلورية. كما في الشكل أدناه (17).



تمثيل بلورة سيليكون نقي عند درجة حرارة صفر كلفن . (17)

نلاحظ من الشكل أعلاه بأن جميع الشحنات مقيدة او متعادلة كهربائياً . اما في درجات الحرارة العالية فأن الالكترونات تكتسب طاقة كافية لتقطع الاواصر فتصبح حرة طليقة تساهم في عملية التوصيل الكهربائي عند تسليط فرق جهد عليها. حيث تكون حركة الالكترونات الحرة في حزمة التوصيل باتجاه معاكس لاتجاه المجال الكهربائي المسلط بينما تتحرك الفجوات بنفس اتجاه المجال. والشكل التالي يبين شبه موصل نقي في درجة حرارة اكبر من الصفر المطلق ونلاحظ فيها الالكترونات الحرة واماكنها الموجبة وتزداد اعداد الالكترونات الحرة الطليقة بزيادة درجة الحرارة.



تمثيل بلورة سيليكون نقي عند درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق . (17)

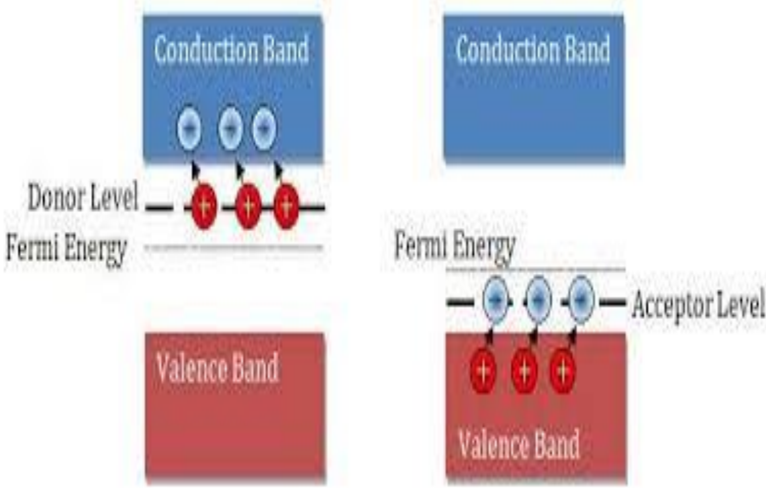
ان عملية توليد ازواج الكترون – فجوة تسمى بالتأين الحراري (thermal ionization), وذلك لان بارتفاع درجة الحرارة تحصل بعض الالكترونات على طاقة وتقفز من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل تاركة خلفها مكاناً شاغراً يحتاج الى الكترون ليتعادل لذا فهو يستطيع ان يحمل شحنة موجبة ويدعى فجوة (hole), وبذلك تتكون الازواج الكترون – فجوة . وهذا مبدأ مهم جداً لفهم الية عمل الخلية الشمسية وكيفية تحويل ضوء الشمس الى طاقة كهربائية.

2 – 3 – 2 اشباه موصلات الغير نقية (المشوبة) اللاذاتية (Extrinsic or Doped Semiconductors)

ان التأين الحراري في المواد الصلبة يعتمد كثيرا على درجة الحرارة حيث ان اي تغير طفيف في درجة الحرارة يحدث تغيراً جذرياً في عدد الشحنات الموجودة في شبه الموصل. وبهذا تكون التوصيلية *(conductivity)* لشبه الموصل حساسة جدا لدرجة الحرارة. الا ان في الاجهزة الالكترونية من الضروري السيطرة على موصلية المواد لتؤدي الاغراض المطلوبة. ولهذا السبب تعالج او تشوب (تطعم) المواد شبه الموصلة النقية مثل السيليكون بأضافة كميات قليلة من ذرات عناصر غريبة تسمى بالشوائب *(impurities)*. فوجود الشوائب في شبه الموصل يزيد من موصليتها ويسيطر عليها من خلال كمية الشوائب المضافة ويختصر الاعتماد على درجة الحرارة ويؤدي الى ظهور نوع واحد من حاملات الشحنة واختفاء او تضاؤل النوع الاخر. وهناك نوعين من اشباه الموصلات الغير نقية : نوع سالب *(n-type)* ونوع موجب *(p-type)*.

اذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الخامسة (كذرات شائبة) من الجدول الدوري (كالفسفور او الزرنيخ او الانتيمون) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسليكون, فأن هذه الذرات الشائبة (اللتي لها خمسة الكترونات تكافؤ) تدخل ضمن تركيب السليكون وتكون اواصر تساهمية مع الذرات الاربعة المحيطة بكل منها ويبقى الكترون واحد, دون ان يدخل ضمن اي اصرة (يبقى مرتبطاً بالذرة الام في درجة الصفر المطلق), وان فصل هذا الالكترون عن الذرةالام لا يحتاج الى طاقة كبيرة, حيث ان هذه الطاقة هي اقل بكثير من الطاقة اللازمة لنقل الكترون من حزمة التكافؤ الى حزمة التوصيل في اشباه الموصلات النقية. ويدعى هذا الالكترون بالكترون الهبة او المانح *(donor electron)* والشوائب بالشوائب المانحة او الواهبة. تؤثر الشوائب على المنطقة المحظورة لشبه الموصل حيث تقللها بسبب استحداث مستوى المانح او الواهب (donor level) الذي يقع اسفل حزمة التوصيل فيزاح مستوى فيرمي نحو حزمة التوصيل ضمن المنطقة المحرمة.

اذا اضيفت كمية من عناصر المجموعة الثالثة من الجدول الدوري (كالبورون او الالمنيوم او الكالسيوم او الانديوم) الى شبه موصل نقي من المجموعة الرابعة كالسيليكون, فأن هذه الذرات الشائبة سوف تحتل مواقع ذرات السليكون وتكون مع الذرات الاربعة المحيطة بكل واحدة منها اواصر تساهمية. ولما كانت ذرات الشوائب (البورون مثلا) تحتوي على ثلاث الكترونات تكافؤ فقط, فعليه سوف تبقى اصرة تساهمية واحدة تحتوي على الكتروناً واحداً وتحتاج الى الكترون اخر لاستكمال البنية البلورية الاعتيادية. فيكون نقصان في عدد الكترونات الاواصر التساهمية ويسمى فجوة (hole) وهو مكان فارغ يحتاج الى الكترون وقد اعتبرت الفجوات كناقلات او حاملات (carriers) شحنة موجبة مساوية لشحنة الالكترون بالمقدار. ولهذا سميت هذه الشوائب بالشوائب المتقبلة (acceptor impurities). يقلل التشويب بالمادة المتقبلة من عرض المنطقة المحظورة ويزيح مستوى فيرمي نحو حزمة التكافؤ ويتكون مستوى الذرات المتقبلة قرب حزمة التكافؤ كما في الشكل أدناه . (17)



مستويات المانح والمتقبل في أشباه الموصلات من النوع n و p . (17)

كثافة الشحنات في اشباه الموصلات الشائبة

ان توصيلية الشوائب تكون غالبة على التوصيلية الذاتية اذا كان تركيز الشوائب الواهبة N_d او المتقبلة N_a اكبر من تركيز حاملات الشحنة الذاتية $n_i=p_i$. وفي شبه الموصل الشائب يقل تركيز الحاملات الاقلية بنفس عدد المرات التي يزيد بها تركيز الحاملات الاكثرية فأذا كان $n_i=n_n=p_n=10^{13}cm^{-3}$ في الجرمانيوم (17) ثم تضاعف تركيز الالكترونات بعد اضافة الذرات المانحة بـ 1000 مرة بحيث اصبح $n_n=10^{16}cm^{-3}$ فسيقل تركيز الفجوات بـ 1000 مرة ويصبح $p_n=10^{10}cm^{-3}$ اي اقل بمليون مرة من تركيز الالكترونات والسبب في ذلك, ان اعادة الاتحاد تتناسب طردياً مع تركيز الالكترونات وبذلك سيتضاعف عدد الالكترونات التي تتحد ثانية مع الفجوات بـ 1000 مرة فتصبح الفجوات 1000 مرة اقل مما كانت عليه. وبالنسبة الى شبه موصل السالب فأن العلاقة: (17)

$$n_n.p_n = n_i^2 \rightarrow 10^{16} \times 10^{10} = (10^{13})^2$$

وما قيل عن شبه الموصل السالب يصح قوله على شبه الموصل الموجب حيث ان $N_a \gg p_i$ ويمكن اعتبار $p_{p \approx N_a}$ اي ان : (17)

$$n_p.p_p = p_i^2 = n_i^2 \rightarrow 10^{10} \times 10^{16} = (10^{13})^2$$

عندما ترتفع درجة حرارة شبه الموصل الشائب كثيراً عن درجة حرارة الغرفة فأن الالكترونات او الفجوات سوف تهيمن على الالكترونات والفجوات الشائبة وتصبح كثافة الالكترونات في حزمة التوصيل مساوية مرة اخرى لكثافة الفجوات في حزمة التكافؤ وهكذا فأن الحرارة العالية غير مرغوب فيها, فهي تبعد عناصر شبه الموصل من اداء عملها بالصورة الاعتيادية. وهذا يفسر تراجع أداء الخلية الشمسية مع أرتفاع درجة حرارتها .

سريان التيار في اشباه الموصلات الشائبة

يسري التيار في المواد بصورة عامة اذا كان هناك :

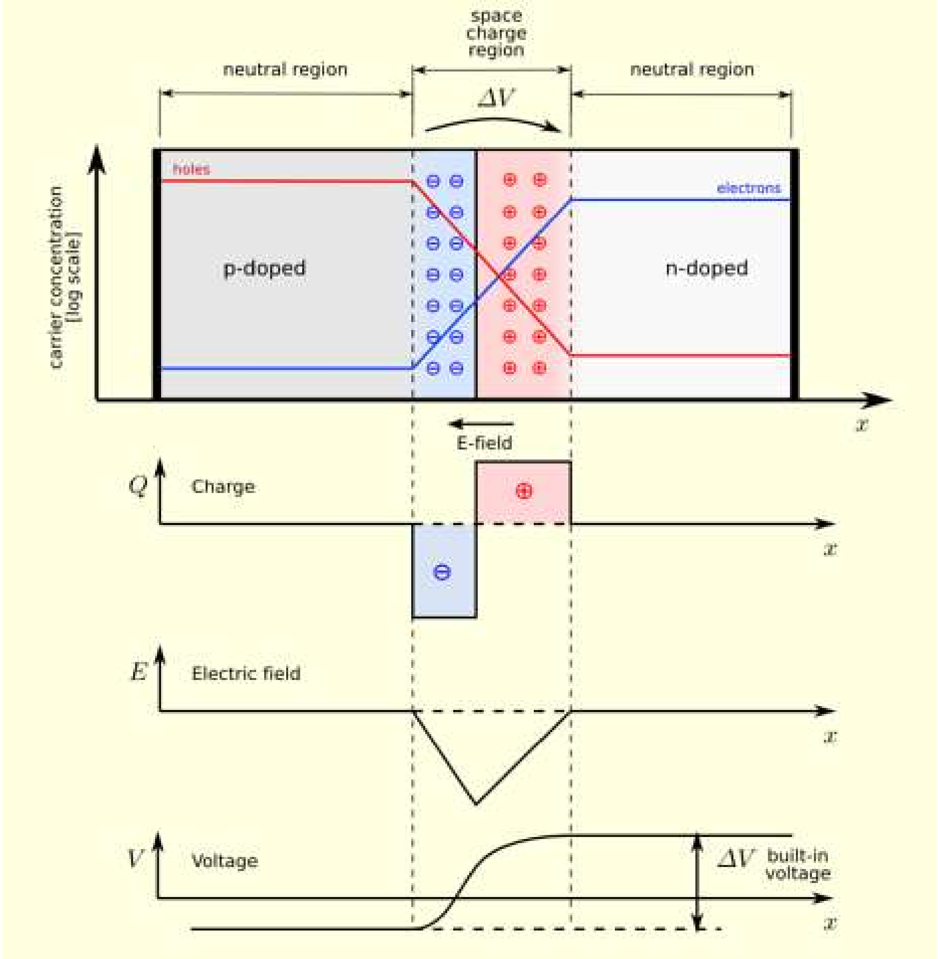
1- انحدار في الجهد $\left(\frac{dV}{dx}\right)$.

2- انحدار في كثافة الحاملات للشحنات السالبة او الموجبة $\left(\frac{dn}{dx}\right)$ او $\left(\frac{dp}{dx}\right)$.

3- تغير في الازاحة الكهربائية مع الزمن $\left(\frac{dD}{dt}\right)$.

يسمى التيار الناتج عن التغير في الازاحة الكهربائية بتيار *الازاحة* (displacement current) وهو يظهر في العوازل فقط. اما التيار الناتج من وجود انحدار في الجهد فيسمى بتيار الحمل او التوصيل وهو يظهر في الموصلات واشباه الموصلات, ويسمى التيار الناتج من حركة كل الالكترونات في حزمة التوصيل او الفجوات في حزمة التكافؤ في شبه موصل ذاتي عند تسليط مجال كهربائي بتيار الانسياق (drift current) تماشياً مع السرعة النهائية التي تصلها حاملات الشحنة اي سرعة الانسياق (drift velocity) . ومن جهة اخرى هناك تيار اخر يظهر فقط في اشباه الموصلات عند غياب المجال الكهربائي وعندما يكون توزيع الشحنات داخل مادة شبه الموصل غير منتظم ويسمى بتيار الانتشار (I_D) (diffusion current) .
ففي الشكل أدناه (17) , اذا كان تركيز الالكترونات في المنطقة -*n* في داخل المادة شبه الموصلة اكبر مما هو عليه في المنطقة -*p* فأن وجود هذا الانحدار في التركيز *(concentration gradient)* سوف يعمل على دفع الالكترونات للانتشار من المنطقة -*n* بأتجاه المنطقة -*p* مؤدياً بذلك الى احداث تيار الانتشار.
هذا وقد وجد ان كثافة تيار الانتشار الناتج من انتشار الالكترونات J_{D_n} تتناسب طردياً مع انحدار التركيز لهذه الالكترونات في المادة شبه الموصلة السالبة .
كذلك فان كثافة تيار الفجوات الناتجة عن انتشار الفجوات J_{D_p} تتناسب طردياً مع انحدار التركيز لهذه الفجوات في المادة شبه الموصلة .
وان اتجاه سريان الفجوات هو في الاتجاه المعاكس لتيار الفجوات بينما يكون تيار انتشار الالكترونات في نفس اتجاه سريان الالكترونات.

مما تقدم يتبين انه في حالة تسليط مجال كهربائي على شبه موصل يحمل انحداراً في تركيز الشحنات بداخله فأن نوعين من التيار سوف يسريان فيه هما: تيار الانسياق وتيار الانتشار .



تغير تركيز الالكترونات والفجوات مع المسافة في شبه الموصل

(أعلى: تركيز الإلكترونات والفجوات في الوصلة; الثاني من أعلى: توزيع كثافة الشحنات; المنحنى الثالث: توزيع المجال الكهربيائي ; أسفل: توزيع الجهد الكهربائي) . (17)

4 – 2 مستوى طاقة فيرمي Fermi energy level

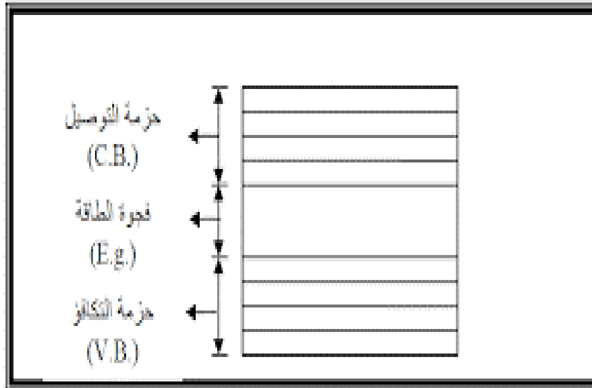
طاقة فيرمي أو مستوى فيرمي في فيزياء الجوامد وفيزياء المواد المكثفة تمثل أعلى مستوى طاقة يشغلها إلكترون عند درجة الصفر المطلق .

عند درجة حرارة الصفر المطلق (صفر كلفن) تكتسب الإلكترونات أي طاقة حرارية تساعدها على التحرك . وتبدأ بملء مستويات الطاقة الأدنى في تجمعات الذرة أولاً ثم الأعلى فالأعلى مشكلة بحراً من الألكترونات يدعى بحر فيرمي , يمثل سطح هذا البحر (طاقة فيرمي Fermi Energy) .(20,21)

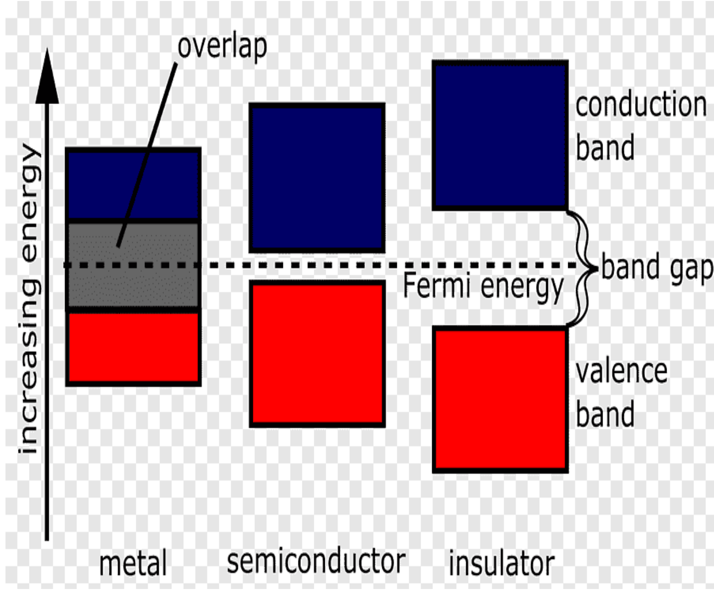
عند أرتفاع درجة الحرارة فوق الصفر المطلق لا تتزحزح طاقة فيرمي عن مكانها على الإطلاق لأنها حد معين مميز للمادة , لكن الألكترونات التي تكتسب طاقة تتعدى هذا الحد , فهي تتوزع فوقه طبقاً لتوزيع بولتزمان وتصبح حرة يمكنها الحركة والتوصيل .

لطاقة فيرمي أهمية كبرى في تعيين موصلية المادة للكهرباء لإنها مسؤول مباشر عن تعيين عدد الإلكترونات التي تصعد لنطاق التوصيل ولذلك تكتسب أهمية أكبر في أشباه الموصلات . فحسب إحصاء فيرمي-ديراك يكون احتمال وجود إلكترون عند مستوى طاقة فيرمي هي 50% ، وكذلك احتمال وجود ثغرة عند نفس مستوى طاقة فيرمي هي أيضا 50% , مما يعني تواجد حوامل شحنة - من النوعين - عند مستوى فيرمي .

الشكلين أدناه توضحان مخطط حزم الطاقة في أشباه الموصلات و توزيع حزم الطاقة للموصلات و أشباه الموصلات و العوازل , على التوالي . (22) .



مخطط حزم الطاقة في أشباه الموصلات



في الموصلات يتداخل نطاقا التكافؤ والتوصيل ، ويقع مستوى فيرمي في منطقة التداخل . عند الصفر المطلق ستكون جميع الإلكترونات أسفل طاقة فيرمي ، ورغم ذلك فبعضها يكون في نطاق التوصيل ، مما يجعلها توصل الكهرباء عند الصفر المطلق . وغني عن الذكر أنها ستوصل الكهرباء عند درجات حرارة أعلى من ذلك .

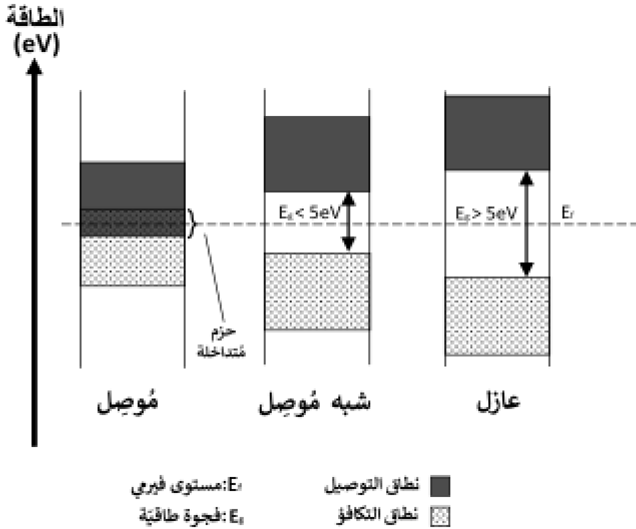
في أشباه الموصلات غير المشوبة يقع مستوى فيرمي في المنتصف بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل ، ولا توجد إلكترونات في نطاق التوصيل عند الصفر المطلق .

لكن عند ارتفاع درجة الحرارة تصعد بعض الإلكترونات إلى نطاق التوصيل وتخلي أماكنها في «نطاق التكافؤ» مخلفة ثغرات، ويزداد عدد الإلكترونات التي تترك ثغرات بارتفاع درجة الحرارة . وهناك تصرفان للإلكترون في هذه الحالة :

- عند إمداد الإلكترونات بطاقة في أشباه الموصلات ، إما بواسطة رفع درجة الحرارة أو بتسليط فوتونات ذات طاقة أكبر من فجوة الطاقة , تلك خيارات غير مقبولة في أغلب التطبيقات بسبب استهلاك كثير من الطاقة الحرارية أو الطاقة الإشعاعية .

- زحزحة مستوى فيرمي صعوداً أو نزولاً لترجيح كفة إما الإلكترونات أو الثغرات . هذه الزحزحة لا تتم برفع الحرارة وإنما تتم عن طريق التشويب إضافة مادة أخرى مناسبة وكلما زاد التشويب يتزحزح المستوى عن مكانه بدرجة أكبر . يتيح التشويب المناسب تغيير مستوى فيرمي إلى القدر المرغوب .

في العوازل ، لا وجود «لإلكترونات توصيل» عند الصفر المطلق . ولكن تتوجد إلكترونات توصيل عند درجات حرارة عالية . ويصبح احتمال توليد إلكترون-فجوة ممكنا، ولكن البُعد بين الطبقات يكون كبيرا في العوازل . بالتالي سنحتاج إلى قدر كبير من استهلاك الطاقة ويكون مكلفا .كما موضح في الشكل أدناه . (21)



هناك ثلاثة أحزمة : حزمة التوصيل ، حزمة التكافؤ ، وفجوة الطاقة . عند درجة حرارة الصفر المطلق تكون جميع الإلكترونات مرتبطة ومتواجدة في حزمة التكافؤ وتنتقل الإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل في اشباه الموصلات عن طريق تسخين المادة أو عن طريق التطعيم أو مجال كهربائي شدته صغيرة . يكون مكان مستوى فيرمي في شبه الموصل النقي في الوسط بين حزمة التوصيل Ec وبين حزمة التكافؤ Ev , أما في شبه الموصل الشائب أي المُطعم كلما استمر إضافة الشوائب إلى شبه الموصل النقي فإنه يزحف منسوب فيرمي نحو حزمة التوصيل أو حزمة التكافؤ . ففي شبه الموصل المشوب بالنوع سالب n-type يكون موضع مستوي فيرمي قريبا من حزمة التوصيل وكلما تزداد الذرات الشائبة المانحة يزحف مستوي فيرمي أكثر ليقترب من حزمة التوصيل أما في شبه الموصل الشائب من النوع موجب p-type فيكون موضع مستوي فيرمي قريبا من حزمة التكافؤ (Ec) .

2 – 5 كثافة المستويات N(E)

عدد الحالات المسموح بها لتصل وحدة طاقة لكل وحدة حجم توصف بدالة كثافة المستويات عند مستوى طاقي E توصف بالمعادلة : (16)

$$N(E) = \left(\frac{2\pi m^*}{h^2}\right)^{3/2} \sqrt{E - Ec}$$

حيث m^* الكتلة الفعلية ويعبر عنها بدلالة كتلة سكون الألكترون بالمعادلة :

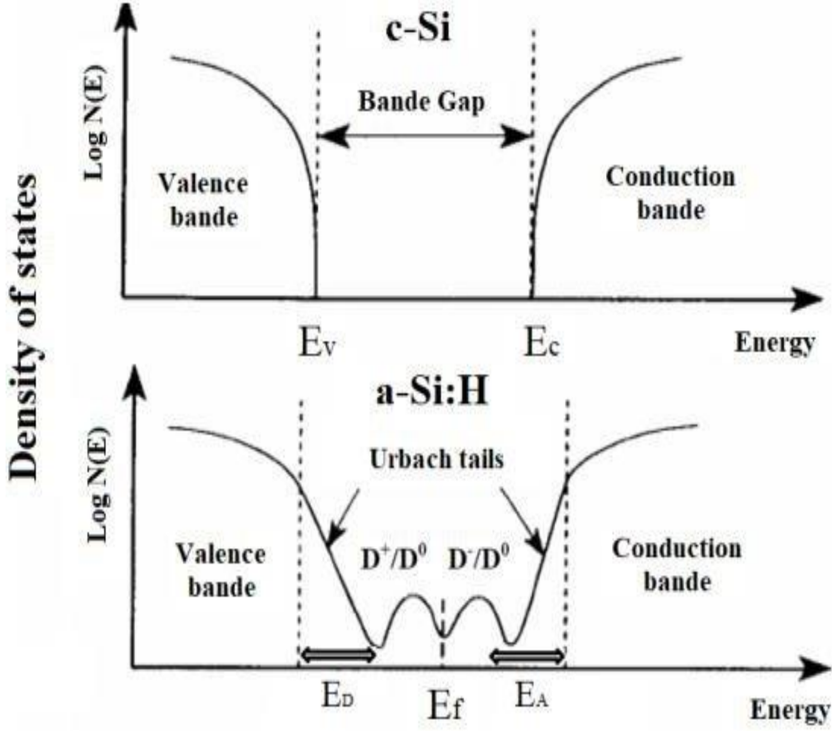
$$m_n^* = \eta_n^* * m_o$$

حيث η_n^* ثابت لا بعدي أقل من الواحد

$$m_p^* = \eta_p^* * m_o$$

وهذه معادلة الفجوات , حيث η_p^* ثابت لا بعدي أقل من الواحد

N(E) تمثل كثافة المستويات , h تمثل ثابت بلانك , Ec تمثل طاقة حزمة التوصيل



نلاحظ من الشكل أعلاه (16) , الذي يوضع العلاقة بين كثافة مستويات الطاقة (عدد مستويات الطاقة لوحدة الحجم) N(E) وطاقة الحزم , إنه في حالة المواد الشبه موصلة المتبلورة (السيليكون البلوري c-Si) تكون قيمة N(E) تساوي صفر , بينما المواد الشبه موصلة الغير متبلورة (السيليكون الغير متبلور a-Si:H) تكون قيمة N(E) لاتساوي صفر .

الأمر الذي يفسر لماذا تفضل أشباه الموصلات المتبلورة على أشباه الموصلات الغير متبلورة في صناعة الخلايا الشمسية .

6 – 2 تأثير درجة الحرارة على موصلية أشباه الموصلات

إن الموصلية الكهربائية للمواد الموصلة تقل بزيادة درجة الحرارة بينما تتحسن في حالة المواد الشبه موصلة , ويفسر ذلك بكون زيادة درجة الحرارة تزيد من مقاومة المواد الموصلة بينما تقلل من مقاومة المواد الشبه موصلة . إن صغر الحاجز الطاقي في المواد الشبه موصلة يجعل التوصيل الكهربائي ممكناً إذا ما أرتفعت درجة الحرارة والسبب في ذلك يرجع الى كون الحاجز الطاقي يقل مع زيادة درجة الحرارة , طبقاً للمعادلة : (16)

$$Eg(T) = Eg(0) - a*T$$

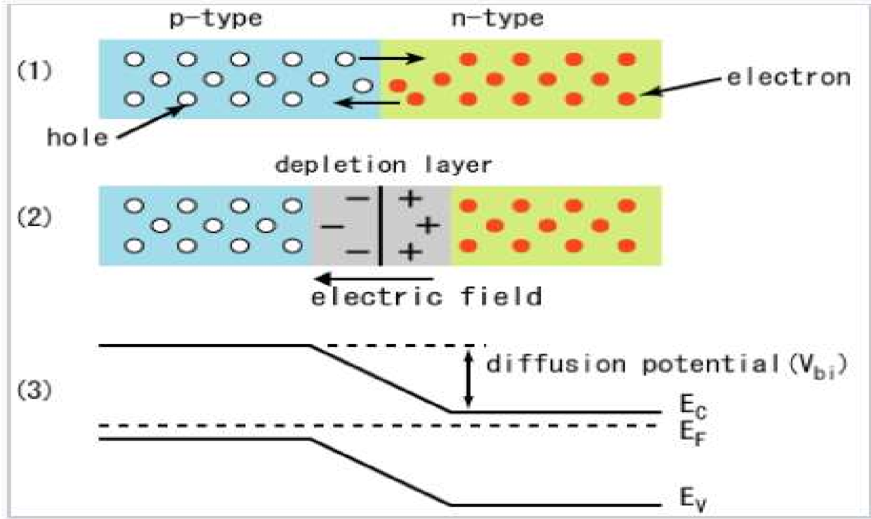
(Eg(0)) تمثل الحاجز الطاقي عند درجة حرارة الصفر المطلق , وحدة قياسها ev ألكترون.فولت

(a) تمثل ثابت يعتمد على نوع المادة الشبه موصلة ويعكس مقدار التناقص في قيمة الحاجز الطاقي Eg لكل أرتفاع في درجة الحرارة

(T) تمثل درجة الحرارة المطلقة , وحدتها الكلفن k^o .

تتفاعل المادة الشبه موصلة مع طاقة فوتونية بصورة تجعل الطاقة الفوتونية الممتصة كافية لنقل الألكترون من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل , وذلك يعني إن الفوتونات ذات الطاقة أكبر من الحاجز الطاقي $E \geq Eg$ هي التي تساهم في إنتاج التيار الكهروضوئي .

نظراً لأن الألكترونات المنتقلة من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل تترك ورائها فجوات يمكن إعتبارها أيونات موجبة , فأن وجود الوصلة الثنائية يصبح ضرورياً لخلق مجال كهربائي ليعمل على فصل وتجميع الحوامل carriers في منطقتي التوصيل و الحمل بصورة تجعل التيار الكلي المتولد عبارة عن مجموع التيار الألكتروني في منطقة التوصيل و تيار الفجوات في منطقة التكافؤ .



تركيب الصمام الثنائي للمادة الشبه موصلة , طاقة منطقة التوصيل Ec وطاقة منطقة التكافؤ Ev

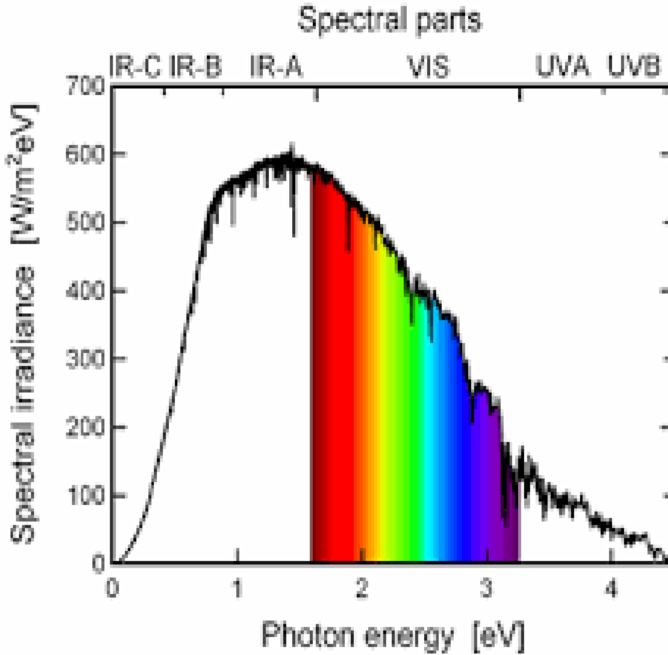
طاقة كهروستاتيكية , طاقة فيرمي Ef طاقة كهروكيميائية (16)

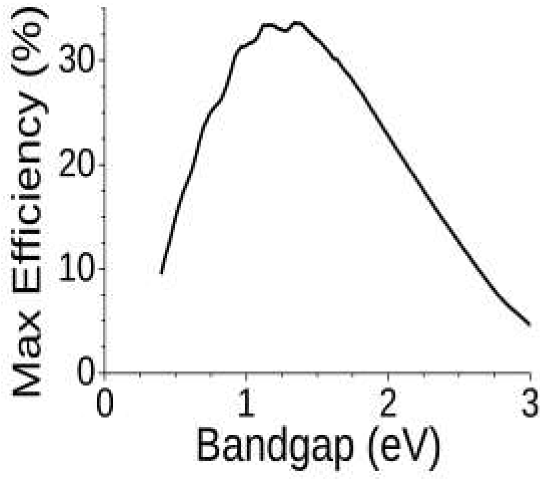
كما ذكرنا مسبقاً , نظراً لكون $N(E) = 0$ في الحاجز الطاقي للمواد الشبه موصلة , فأن إستحداث مستويات طاقية في الحاجز الطاقي للمادة الشبه موصلة لايتم إلا بحقنها بالشوائب المعطية للألكترونات (السالبة) أو تلك المكتسبة للألكترونات (الموجبة) بصورة تجعل المستوى الطاقي للشوائب المعطية E_D قريبة من مستوى طاقة التوصيل Ec , والمستوى الطاقي للشوائب المكتسبة E_A قريب من مستوى طاقة التكافؤ Ev الأمر الذي يحسن من الموصلية الكهربائية للمادة الشبه موصلة , وذلك بتغليب عدد الحوامل السالبة carrier n على الموجبة carrier p في حالة الشوائب المعطية , وتغليب عدد الحوامل الموجبة على السالبة في حالة الشوائب المكتسبة . أي خلق إزاحة في موضع مستوى طاقة فيرمي نحو المستوي الطاقي للشائبة المضافة . (16)

2 – 7 طيف الأشعاع الشمسي الساقط

إمتصاص الفوتونات في المادة الشبه موصلة يسفر عن توليد أزواج من حوامل التيار الموجبة والسالبة , ويتم ذلك بالأنتقال المباشر للألكترونات من منطقة التكافؤ الى منطقة التوصيل عبر الحاجز الطاقي للمادة الشبه موصلة Eg .

فأن إنتقال الألكترونات عبر الحاجز الطاقي لا يتم إلا إذا كانت طاقة الفوتون الممتص أكبر من الحاجز الطاقي $E \geq Eg$, ولتفسير ذلك ننظر الى التوزيع الطيفي للأشعاع الشمسي الساقط على وحدة المساحة , حيث يوضح أن الأشعاع الشمسي الساقط ينقسم الى أشعاع بطاقة أقل من الحاجز الطاقي وسيكون إشعاع لايساهم في إنتاج التيار الفوتوني ويتبدد على شكل حرارة , و القسم الذي يملك طاقة أعلى من الحاجز الطاقي سيساهم في توليد التيار و الطاقة الفائضة تضيع كحرارة , فعليه إنتاج التيار الفوتوني يعتمد كلياً على الفوتونات الواقعة ضمن الحاجز الطاقي , وكذلك هناك أشعة تنفذ خلال الخلية ولا تمتص فهي أيضاً لاتساهم في إنتاج التيار . إي إن هناك حاجز طاقي معين يكون عنده إنتاج الكهرباء الشمسية أقصى ما يمكن . فمثلاً للسيليكون يكون الحاجز الطاقي 1.2 ev كما موضح في الاشكال أدناه الذي يوضح التوزيع الطيفي للأشعاع الشمسي الساقط بالنسبة للسيليكون . (16)




Max Efficiency (%)
30
20
10
0
0
1
2
3
Bandgap (eV)

الفصل الثالث

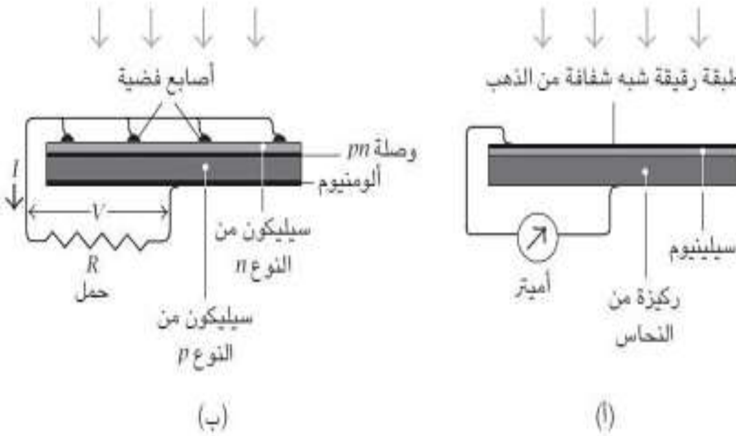
مبدأ عمل الخلية الشمسية

3 – 1 المفاهيم الأساسية

الخلية الشمسية جهاز في الحالة الصلبة يحول ضوء الشمس , على هيئة تدفق من الفوتونات ، إلى طاقة كهربائية الشكل أدناه (ب) (15) , يوضح تركيب أي خلية شمسية قياسية .

القاعدة قطعة من السيليكون من النوع p المشوبة قليلاً بالبورون التي سمكها أقل من 1mm . وقد أنشئ قطعة من السيليكون من النوع n العالية الإشابة بسمك اقل من 1 µm مشوبة بالفسفور بتركيز أعلى بكثير .

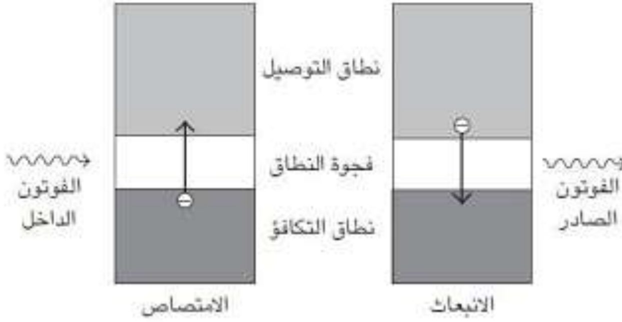
وبسبب الجهد الداخلي للوصلة p-n , تنتقل الألكترونات الى المنطقة من نوع n و تولد طاقة كهربائية شبيهة لتلك التي تولدها اي بطارية كهروكيميائية .



خلية شمسية مصنوعة من السيلينيوم وأخرى مصنوعة من السيليكون. (أ) اكتُشفَت الخلية الكهروضوئية المصنوعة من السيلينيوم في منتصف القرن التاسع عشر واستُخدمت لقياس شدة الإضاءة في التصوير الفوتوغرافي. (ب) اختُرعت الخلية الكهروضوئية المصنوعة من السيليكون في مختبرات بيل في عام 1954 باستخدام التقنية الخاصة بترانزستورات السيليكون.

وطبقًا لنظرية الانتقالات الكمية يتفاعل الإشعاع، على هيئة تدفق من الفوتونات، مع شبه الموصل بطريقتين , يمكن امتصاص فوتون بطاقة أكبر من طاقة الفجوة الخاصة بالمادة شبه الموصلة وإنشاء زوج إلكترون وثغرة . ويمكن لهذا الزوج أن يعيد الاتحاد ويُصدر فوتونًا من الطاقة مساويًا تقريبًا لفجوة الطاقة الخاصة بشبه الموصل . وطبقًا لمبدأ التوازن فإن احتمالات العمليتَيْن (توليد الكترون-فجوة و إعادة الإتحاد) متساوية . وتعتبر نتيجة مهمة فيما يتعلَّق بكفاءة الخلايا الشمسية ولأن الطاقة الخاصة بزوج الإلكترون والثغرة مساوية لقيمة نطاق الطاقة ، فإن أفضل مادة يجب أن تكون فجوة النطاق الخاصة بها قريبة من وسط الطيف الشمسي . كما في الشكل أدناه (15) .

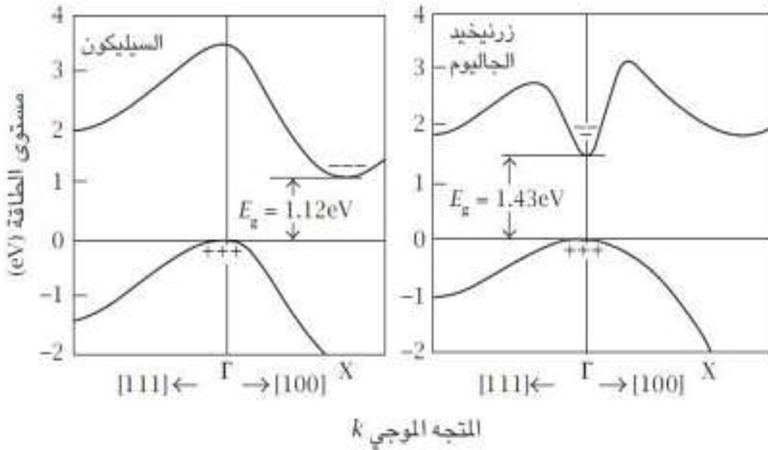
الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



تفاعل الإشعاع مع أشباه الموصلات: طبقًا لنظرية الانتقالات الكمية، يمكن أن يُمتَص أي فوتون بطاقة أكبر من طاقة الفجوة الخاصة بالمادة شبه الموصلة وينشئ زوج إلكترون وثغرة. ويمكن لهذا الزوج أن يعيد الاتحاد ويُصدر فوتونًا من الطاقة مساويًا تقريبًا لفجوة الطاقة الخاصة بشبه الموصل.

وهناك عامل آخر يؤثر على كفاءة الخلايا الشمسية وهو نوع فجوة الطاقة , اعتمادًا على الموقع النسبي للجزء العلوي من نطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل في فضاء المتجه الموجي ، أما أن يكون شبه موصل مباشر أو غير مباشر .

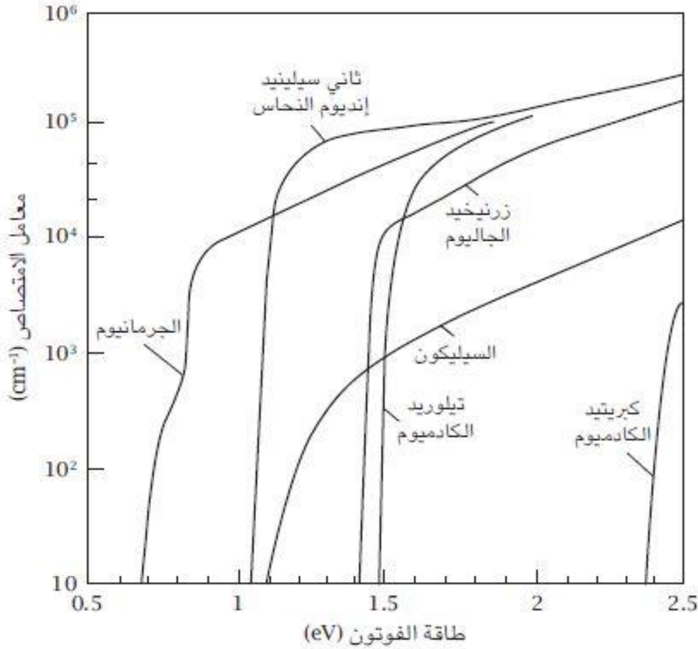
بالنسبة لأشباه الموصلات ذات الفجوة المباشرة مثل زرنيخيد الجاليوم وثاني سيلينيد إنديوم النحاس وتيلوريد الكادميوم ، يمكن لفوتون على نحو مباشر إثارة إلكترون من نطاق التكافؤ لنطاق التوصيل ؛ و يكون معامل الامتصاص عاليًا ، بوجه عام أكبر من ($1 * 10^4 \quad cm^{-1}$) . وبالنسبة لأشباه الموصلات ذات الفجوة غير المباشرة مثل السيليكون و الجرمانيوم , لا تكون هناك محاذاة بين الجزء العلوي من نطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل في فضاء المتجه الموجي ، وتحدث الإثارة نتيجة لتوسط فوتون ، أو بعبارة أخرى، اهتزاز شبكي ؛ من ثَم يكون معامل الامتصاص قليلًا، بوجه عام أقل من ($1 * 10^3 \quad cm^{-1}$) , وتكون هناك حاجة لركيزة أكثر سمكاً . كما في الشكل أدناه (15) .



أشباه الموصلات المباشرة وغير المباشرة: اعتمادًا على الموقع النسبي للجزء العلوي من نطاق التكافؤ والجزء السفلي من نطاق التوصيل في فضاء المتجه الموجي، يمكن أن تكون فجوة الطاقة لأي شبه موصل مباشرة أو غير مباشرة. وأشباه الموصلات المباشرة لها معامل امتصاص أعلى بكثير من ذلك الخاص بأشباه الموصلات غير المباشرة. وكما هو واضح، السيليكون شبه موصل غير مباشر وزرنيخيد الجاليوم شبه موصل مباشر.

ويعرض الشكل التالي (15) أطياف الأمتصاص لأكثر المواد الشبه موصلة إستخداماً في الخلية الشمسية . ويعرض الجدول أدناه (15) خواص أكثر المواد إستخداماً في الخلية الشمسية .

الخلايا الشمسية المصنوعة من أشباه موصلات



أطياف الامتصاص لأكثر المواد شبه الموصلة استخدامًا في الخلايا الشمسية: إن أكثر مادة استخدامًا في الخلايا الشمسية، وهي السيليكون، شبه موصل غير مباشر، وهي لها معامل امتصاص قليل نسبيًا، بوجه عام $10^3 cm^{-1}$. وهناك حاجة لسمك قدره 0.01cm للحصول على امتصاص فعال. وأشباه الموصلات المباشرة، مثل زرنيخيد الجاليوم وثاني سيلينيد إنديوم النحاس وتيلوريد الكادميوم، لها معامل امتصاص يتراوح بين $10^4 cm^{-1}$ و$10^5 cm^{-1}$. ويكون السمك الذي قدره بضعة ميكرومترات كافيًا لامتصاص شبه كامل.

خواص أكثر المواد استخداماً في الخلايا الشمسية.

المادة	الجرمانيوم	ثاني سيلينيد إنديوم النحاس	السيليكون	زرنيخيد الجاليوم	تيلوريد الكادميوم
النوع	غير مباشر	مباشر	غير مباشر	مباشر	مباشر
فجوة النطاق (eV)	0.67	1.04	1.11	1.43	1.49
حافة الامتصاص (μm)	1.85	1.19	1.12	0.87	0.83
معامل الامتصاص (cm^{-1})	5×10^4	1×10^5	1×10^3	1.5×10^4	3×10^4

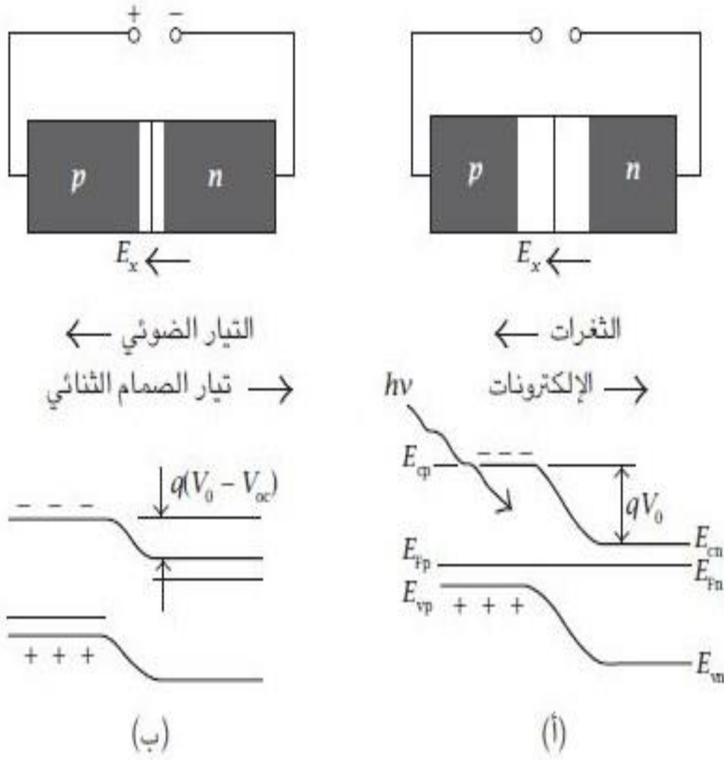
3 – 2 توليد الطاقة الكهربائية

يوضح الشكل أدناه شرحاً كمياً (حسب تفسير فيزياء الكم) لكيفية توليد الطاقة الكهربائية من خلية شمسية . يولد أي فوتون زوج ألكترون و ثغرة في المنطقة من النوع P , وبسبب المجال الكهربائي الداخلي , الذي يشير بإتجاه المنطقة من النوع P , تنجرف الألكترونات الى المنطقة من النوع N , في حين تبقى الثغرات في المنطقة P , وبتوصيل الطرفين معاً , يمكن أن تنتقل كل الألكترونات المولدة من قبل الفوتونات الى المنطقة N , وتكمل الدائرة .

وتيار دائرة القصر (Short-circuit current Isc) هو تيار الألكترونات التي يولدها ضوء الشمس , كما موضح في الشكل أدناه (أ) . (15)

إذا لم تتصل المنطقتان خارجياً تولد الشحنات المتراكمة في المنطقتين (تراكم الالكترونات في المنطقة n , وتراكم الثغرات في المنطقة p) جهداً عبر تكثيف الوصلة junction , ويصبح الجهد فرق جهد أمامي للصمام الثنائي (وصلة الخلية p-n junction تعمل كصمام ثنائي diode) , ويقل سمك منطقة الأنتقال وينشأ تيار صمام ثنائي أمامي , وعندما يتساوى تيار الصمام الثنائي الأمامي مع تيار الجرف الخاص بالألكترونات التي تولدها الفوتونات يحدث توازن .

ويكون فرق الجهد في الطرفين فرق جهد الدائرة المفتوحة والتي يطلق عليها (Open-circuit voltage Voc) للخلية الشمسية . كما في الشكل أدناه (ب) . (15)

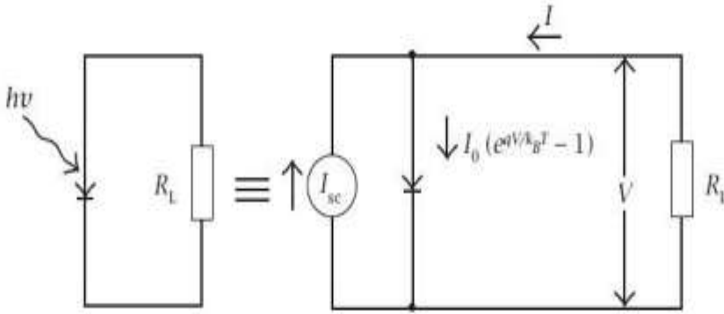


تولد الألكترونات والثغرات في الخلية الشمسية . (أ) توصيل الطرفين ونشوء Isc .

(ب) عدم التوصيل و نشوء Voc

3 – 3 معادلة الخلية الكهروضوئية (الدائرة المكافئة)

يمكن تمثيل أي خلية شمسية بمصدر تيار مستمر , عند سقوط أشعة الشمس عليها تولد تيار , مربوطة على التوازي بصمام ثنائي لوصلة p-n junction , كما في الشكل أدناه . (15)



من خلال معادلة الصمام الثنائي : (15)

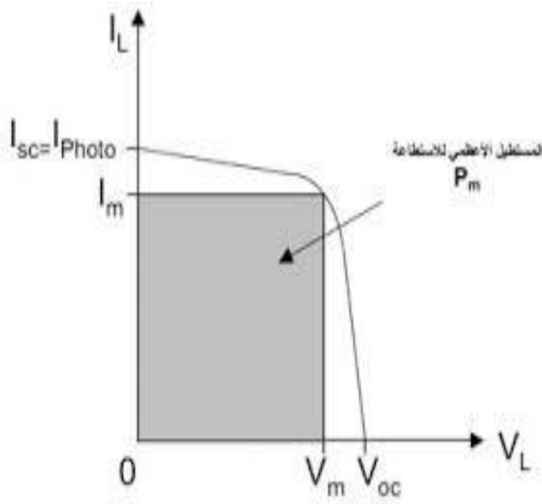
$$I = I_O\left(e^{qV/K_BT} - 1\right) - I_{sc}$$

التي تعد المعادلة الأساسية للخلايا الشمسية , في صيغة متناسقة مع معادلة الصمام الثنائي , في حين أن فرق الجهد يكون دائماً موجباً , فإن التيار يكون دائماً سالباً , وهذا أمر مفهوم لأن الصمام الثنائي جهاز سالب يستهلك طاقة . بينما الخلية الشمسية تعتبر بطارية , يجب عكس إتجاه التيار , لذا فإن ما يلي صيغة أفضل لمعادلة الخلية الشمسية : (15)

$$I = I_{sc} - I_O\left(e^{qV/K_BT} - 1\right)$$

حيث فرق الجهد و التيار دائماً موجبان .

إن فرق جهد الدائرة المفتوحة Voc هو فرق الجهد الذي يكون عنده التيار صفراً , كما موضح في الشكل أدناه :(15)



فستكون معادلة التيار بعد مساواتها بالصفر :

$$I_o\left(e^{qVoc/K_BT}-1\right)=I_{sc}$$

من ثم تكون معادلة جهد الدائرة المفتوحة : (1,15)

$$V_{oc}=\frac{K_BT}{q}\,ln\left(\frac{I_{sc}}{I_o}+1\right)$$

بما ان الهدف هو تحسين أداء الخلية الشمسية , وتحسين أداء الخلية يتم برفع قيمة جهد الخلية المفتوحة , فلذلك يجب تقليل تيار الفقد والموجود في الحد الاخير في المعادلة I_O لزيادة قيمة فرق الجهد V_{oc} وبالتالي تحسين اداء الخلية الشمسية .

ويتم حساب قيمة تيار الفقد من المعادلة الاتية : (1)

$$I_O = (I_O e - pass + I_O e - contact) + I_O bulk + (I_O BS - pass + I_O BS - contact)$$

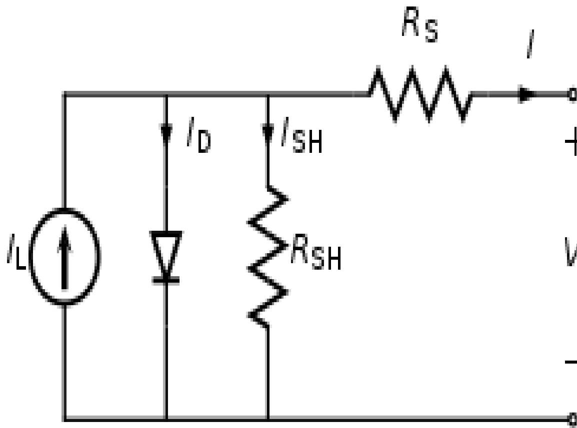
نلاحظ من المعادلة ان قيمة تيار الفقد I_O هو مجموع ثلاث تيارات : الفقد في سطح الخلية (emitter- e) , و الفقد في مادة الخلية (bulk) , و الفقد في السطح الخلفي للخلية (Back-Side BS) .

فالحد الاول يحدد تيار الفقد في سطح الخلية في طبقة الباعث Emitter ويشمل تيار الفقد في المساحة بين موصلات الفضة وهي $I_O e - pass$ و تيار الفقد في منطقة موصلات الفضة $I_O e - contact$ وهي تكون اعلى لان عملية تركيب موصلات الفضة تسبب تخريب بسيط في منطقة التركيب .(1)

الحد الثاني يمثل الفقد في مادة الخلية $I_O bulk$ والتي تحدث نتيجة وجود شوائب مثل الحديد و الكروم وغيرها , لذلك يجب استخدام سليكون نقي لزيادة الكفاءة وتقليل تيار الفقد وبالتالي نحصل على جهد دائرة مفتوحة عالي . اذن اهم معيار لانتاج خلايا شمسية بكفاءة عالية هي نقاوة السليكون وهي اهم معيار على الاطلاق .(1)

الحد الثالث يشمل تيار الفقد في سطح الخلية الخلفي BS وتشمل تيار الفقد بين الموصلات الخلفية $I_O BS - pass$ و تيار الفقد عند الموصلات الخلفية $I_O BS - contact$.

وكذلك هناك علاقة بين تقليل تيار الفقد I_O و قيم المقاومة R_S Series Resistance والمقاومة R_{sh}, كما في الشكل التالي . (1)



كما ذكرنا سابقاً فأننا نشبه الخلية الشمسية بمصدر للتيار الكهربائي بحيث اذا سقطت اشعة الشمس عليها تولد تيار ولو نستعيض عن الخلية الشمسية بدايود واحد لتكون اكثر بساطة في تحليل المعطيات .

سيمر تيار يسمى I_{sh} ويكون بين القطب الموجب والسالب , ولدينا مقاومة R_S وهي تمثل المقاومة الكلية الداخلية للخلية يعني مقاومة خطوط الفضة ومقاومة مواد الخلية وكلما زادت هذه المقاومة قلت كفاءة الخلية وينبعج منحني القدرة للاسفل ويقل معامل الملئ Fill Factor للخلية .

اما المقاومة R_{sh} وهي مقاومة عزل السطح الامامي emitter تماما عن خلف الخلية BS يعني الفصل الكهربائي كلما كانت كبيرة كانت كفاءة الخلية اعلى .

فلو لاحظنا المعادلة الاتية وهي معادلة التيار : (1)

$$I = I_{sc} - I_O \left(e^{q(V+I*R_S)/K_BT} - (V + I * \frac{R_S}{R_{sh}}) \right)$$

نلاحظ الحد الاخير في المعادلة , فأنه كلما زادت قيمة R_S فسيزيد الفقد في قيمة التيار بينما كلما زادت قيمة R_{sh} يقل قيمة الفقد في التيارولو صلت قيمتها لقيم كبيرة جدا يمكن ان نهمل الحد الاخير في المعادلة مما يحسن اداء الخلية .

ولدينا ايضا الحد الثاني في المعادلة وفيها I_O وهو يمثل تيار الفقد Leak Current يجب ان يقلل ايضا لتقليل الفقد في التيار و تحسين اداء الخلية الشمسية . فزيادة تيار الفقد يقلل الفولتية للخلية وكلما قل تيار الفقد سيزيد فرق الجهد للخلية ويحسن الاداء .

فعوامل تحسين اداء الخلية الشمسية المتمثلة بالاشعاع الشمسي و درجة الحرارة يصعب التحكم بها لذلك يتم التحكم بعوامل اخرى لتحسين الاداء مثلا تقليل المقاومة الداخلية للخلية و تقليل تيار الفقد وهذه كانت مهمة تطوير الخلايا الشمسية وهي تقليل المقاومة الداخلية و تيار الفقد .

اذن الهدف هو تقليل تيار الفقد وبالتالي تحسين فرق جهد الدائرة المفتوحة للخلية والنتيجة تحسين اداء الخلية . وكذلك في طبقة الباعث (سطح الخلية الامامي) Emitter نرفع المقاومة السطحية لطبقة الباعث Emitter n^+ قدر الامكان وهذه العملية تتطلب بان تكون خطوط الفضة ملائمة جدا لتقوم بعملية التوصيل .

يعني كلما زادت المقاومة السطحية R_{sh} Sheet Resistance للباعث كلما صعبت عملية التوصيل بالفضة وهذه لها علاقة بتركيب الفضة, و كلما رفعنا المقاومة السطحية للباعث كلما زادت Voc وتحسن اداء الخلية . (1)

3 – 4 القدرة القصوى وعامل الأمتلاء

تتحدد قدرة الخرج P للخلية الشمسية بحاصل ضرب فرق الجهد V و التيار I (P = I * V) , وتكون دائماً أقل من حاصل ضرب تيار دائرة القصر Isc في فرق جهد الدائرة المفتوحة Voc , والقدرة المقدرة للخلية الشمسية (القدرة الأسمية) هي أقصى قدرة خرج بتدفق للفوتونات قدره 1 sun أو يعبر عنها $1\ kw/m^2$ في ظل ظروف قياسية , بوجه عام , إن شرط القدرة القصوى هو :(15)

$$dp = IdV + VdI = 0$$

بعبارة أخرى :

$$\frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V}$$

طبقاً لمعادلة الخلية الشمسية , إن قدرة الخرج كدالة لفرق جهد الدخل V هي : (15)

$$P = IV = \left[I_{sc} - I_0\left(e^{qv/K_BT} - 1\right)\right] V$$

يكون فرق جهد القدرة القصوى أقل فقط بقليل من فرق جهد الدائرة المفتوحة :

$$V = V_{oc} - v$$

يمكن تبسيط معادلة القدرة :

$$P \approx I_{sc}\,(V_{oc} - v)\left[1 - e^{-qv/k_BT}\right]$$

وبالنسبة لعامل الأمتلاء nf المعرف من خلال : (15)

$$\eta f \equiv \frac{I_{mp}V_{mp}}{V_{oc}I_{sc}}$$

معامل الملئ Fill Factor : قسمة القدرة الاعظمية للوح على حاصل ضرب جهد الدائرة المفتوحة Voc في تيار دائرة القصر Isc , كما في الشكل أدناه (1)

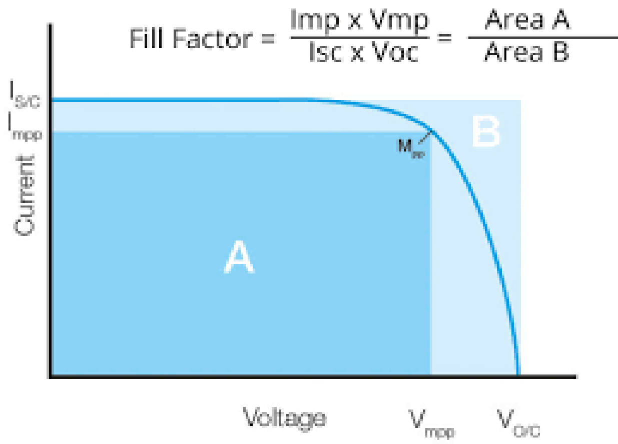
ويتم تصنيف جودة اللوح كالاتي :(1)

اكبر من 0.80 ممتاز

اكبر من 0.79 جيد جدا

اكبر من 0.78 جيد

اكبر من 0.75 اعتيادي



3 – 5 حد شوكلي و كويسيه

في عام 1961 , أنجز وليم شوكلي وهانس كويسيه تحليلًا شاملًا للخلية الشمسية القائمة على وصلة p-n و وضعاحداً أقصى لكفاءة الخلايا الكهروضوئية أحادية الوصلة كنتيجة لمبدأ التوازن التفصيلي (15) , وتُعرف الكفاءة على أنها نسبة القدرة المقدمة لحمل معين في مقابل قدرة الإشعاع الساقط للخلية الشمسية .وهناك ثلاثة معاملات في هذا الشأن : درجة حرارة الشمس , T_* , ودرجة حرارة الخلية , T_C , وفجوة طاقة شبه الموصل , E_g , وتعتمد الكفاءة على نسبتين لابعديتين : (15)

$$X_S = \frac{E_g}{K_B T_*}$$

$$X_C = \frac{E_g}{K_B T_C}$$

بصورة عامة , إن $K_B T_*$ تساوي 0.5ev , في حين إن $K_B T_C$ تساوي 0.025ev - , و E_g تتراوح بين 1ev و 2ev , ومن ثم فأن القيمة الأسية القياسية هي إن X_S تتراوح تقريباً بين 2 و 4- , و X_C تتراوح بين 40 و 80- (15) .

وإعتمد تحليل شوكلي و كويسيه على الأفتراضات التالية :

1 - وصلة pn واحدة .

2 - وزج ألكترون وفجوة واحد مثار لكل فوتون داخل .

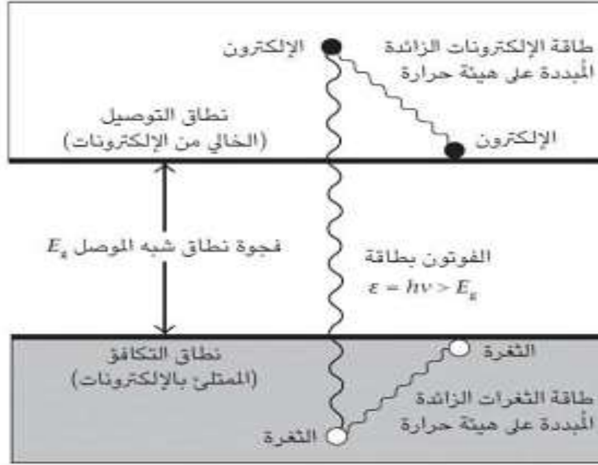
3 - طاقة الألكترون و الفجوة الزائدة عن فجوة النطاق تتبدد بشكل حرارة .

4 - الإضاءة بضوء شمس غير مركز .

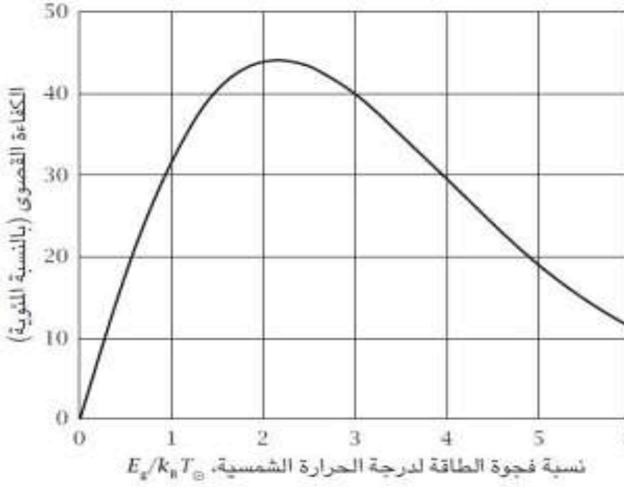
الافتراضات السابقة متحققة على نحو جيد في الغالبية العظمى من الخلايا الشمسية التقليدية , ويتم التحقق من النتائج من خلال التجارب ما لم يستبعد واحد أو أكثر من تلك الأفتراضات , مثلاً عند إستخدام ضوء شمس مركز , ومع ذلك نحافظ نظرية شوكلي و كويسيه على كونها صحيحة .

3 – 6 الكفاءة القصوى

قدَّر شوكلي وكويسيه نسبة قدرة أزواج الإلكترونات والفجوات وقدرة الإشعاع الساقط بافتراض أن امتصاصية شبه الموصل للفوتونات بطاقة أقل من E_g تكون صفراً ولتلك التي بطاقة أكبر من E_g تكون واحد , ويستخدم أيضاً لتقدير نسبة الإتحاد الإشعاعي لزوج ألكترون فجوة , بالنسبة للفوتونات التي طاقتها أكبر من فجوة الطاقة تتبدد سريعاً بهيئة طاقة حرارية من الألكترونات , أي إنه يمكن لفوتون بطاقة أكبر من فجوة نطاق شبه موصل أن يثير ألكترون من نطاق التكافؤ الى نطاق التوصيل . وطاقة زوج الألكترون و الفجوة الزائدة عن فجوة النطاق تتبدد سريعاً على هيئة طاقة حرارية بمقياس زمني قدره 10^{-11} Sec. و جزء طاقة الفوتونات المستخدمة في التحويل للطاقة الكهربائية يساوي فجوة النطاق . كما موضح في الشكل أدناه . (15)



و عليه فأن الكفاءة القصوى للخلايا الكهروضوئية هي فقط أمتصاص جزء طاقة الفوتونات المساوية لفجوة النطاق وتبدد الطاقة الفائضة بشكل حرارة . وعندما تكون نسبة فجوة النطاق الى درجة الحرارة الشمسية $\frac{E_g}{K_B T_*}$ تساوي 2.2 تكون الكفاءة القصوى 44% . كما في الشكل التالي . (15)



وعندما تكون T_* تساوي 5800 K , وتساوي $K_B T_*$ تقريباً 0.5ev , تكون فجوة النطاق المثلى 1.1ev . وعليه عندما تكون فجوة النطاق صغيرة يكون إمتصاص الفوتونات كبيراً , ولكن معظم طاقة الفوتونات تتبدد على هيئة حرارة , وعندما تكون فجوة النطاق كبيرة يقل مدى الأمتصاص الطيفي .

3 – 7 وقت أعادة الإتحاد

تحدد الكفاءة القصوى أقصى تيار دائرة مفتوحة لأي خلية شمسية , والذي يقابل قدرة أزواج الألكترونات و الفجوات التي يولدها الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الخلية الشمسية , وكذلك يتولد تيار تسريب (تيار الإشباع العكسي) عند أي وصلة pn , وكلما زاد تيار الإشباع العكسي قل فرق جهد الدائرة المفتوحة وبالتالي تقل الكفاءة ,والعامل المهم المحدد هو وقت إعادة الإتحاد , حيث بمجرد توليد زوج ألكترون و فجوة بإمتصاص فوتون ضوء يكون لدى الزوج ميل لإعادة الإتحاد بتوليد إشعاع أو إطلاق طاقة , حسب مبدأ التوازن التفصيلي , حيث تخضع أزواج الألكترونات والفجوات في أي خلية شمسية لنوعين رئيسيين من العمليات : توليد أزواج ألكترون و فجوة من قبل الإشعاع الشمسي و عدة عمليات إعادة إتحاد .

ويمكن تقليل أو تجنب العوامل العديدة التي تؤدي لإعادة الأتحاد , والتي تعتبر سلبية على كفاءة الخلية , ومبدأ التوازن التفصيلي يقوم على كون معدل التوليد مساوي لمعدل الإتحاد , أي إن الأنبعاثية تساوي الأمتصاصية عند أي طول موجي معين .

3 – 8 جهد الدائرة المفتوح للخلية

يعتبر أهم معيار لمعرفة جودة اللوح الشمسي والاطار الزمني الذي تم فيها تصنيع اللوح , ويمكن تقييم كفاءة الخلايا الشمسية ومن ثم كفاءة الألواح الشمسية من قيمة جهد الدائرة المفتوحة . (1)

ألواح احادية البلورة Mon crystalline panels

بقسمة جهد اللوح على عدد خلايا اللوح فأذا كان الجهد . (1)

اكبر من 685 ملي فولت ممتاز

اكبر من 680 ملي فولت جيد جدا

اكبر من 675 ملي فولت جيد

اكبر من 660 ملي فولت اعتيادي

الواح متعددة البلورات Multi crystalline panels

اكبر من 660 ملي فولت ممتاز

اكبر من 650 ملي فولت جيد جدا

اكبر من 640 ملي فولت جيد

اكبر من 620 ملي فولت اعتيادي

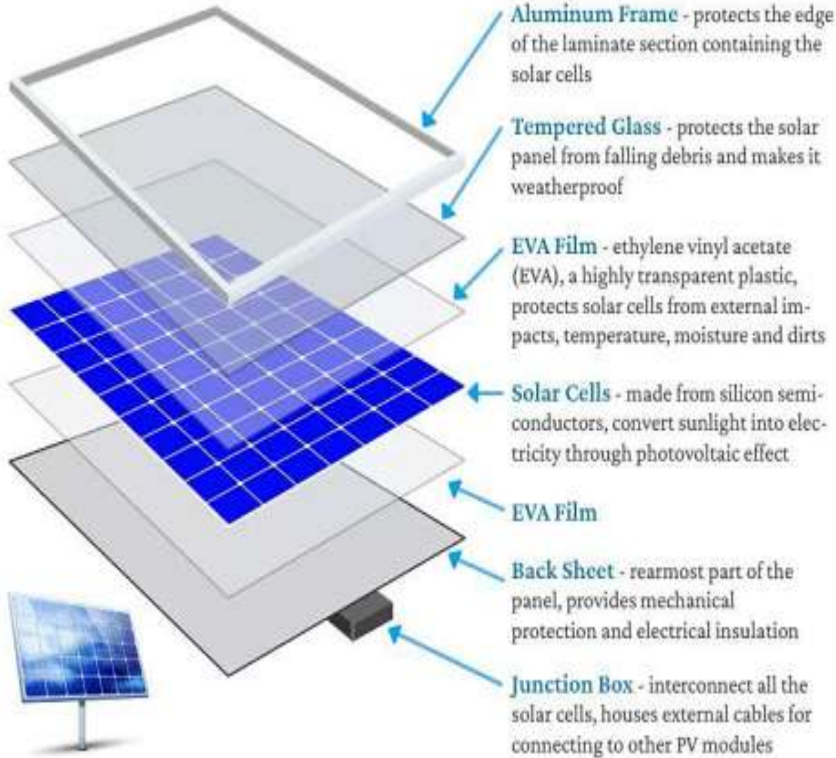
اذن مستوى فولتية الخلايا مهم جدا كمعيار للتقدم بأداء الالواح , فكلما ارتفع الجهد كلما تحسن اداء اللوح . وخلايا Full Back Surface فولتيتها لا تتجاوز 660 ملي فولت ولكن عند التحول لتقنية الـ PERC والتي استغرقت سنوات الى ان اصبحت تجارية واقتصادية , هذه التقنية قللت عملية تسرب تيار التشبع Io عند السطح الخلفي للخلية rear surface بشكل كبير جدا , وعملية اعادة الالتحام لحاملات الالكترونات والبروتونات Recombination Carriers , فارتفع جهدها الى 685 ملي فولت , وكذلك نلاحظ خلايا الـ Heterojunction وصلت لـ 730 و 740 ملي فولت .

الفصل الرابع

مكونات اللوح الكهروضوئي

4 – 1 مكونات اللوح الشمسي

حافظ اللوح الشمسي على تركيب نمطي لم يتغير من سنوات وهو أطار معدني و زجاج وطبقة عازلة شفافة EVA و الخلايا الشمسية و طبقة EVA و من ثم الطبقة الخلفية و صندوق الربط . لكن التغييرات التي حدثت هي تغير الخلية الشمسية وتغير التقنية المستخدمة في صناعة الخلية الشمسية . سنتطرق هنا الى أهم مكونات اللوح الشمسي .



2 – 4 الزجاج The glass

أهم وظيفة لطبقة الزجاج هي الحماية من التلف , حيث يعمل زجاج الألواح الشمسية المقوى Tempered solar panel glass كطبقة واقية للألواح الشمسية ، مما يمنع العوامل البيئية مثل الأبخرة والمياه والأوساخ من إتلاف الخلايا الكهروضوئية . يوفر زجاج الألواح الشمسية المقسّى tempered glass أيضًا قوة عالية , ونفاذية ممتازة , وانعكاسًا منخفضًا .

تم تطوير زجاج خالي من التحلل الناجم المحتمل PID-free(Potential Induced Degradation free) باستخدام زجاج جديد مُخفف كيميائيًا عن طريق استبدال أيونات الصوديوم Na بأيونات البوتاسيوم K في منطقة السطح , هذا النوع من الزجاج عبارة عن زجاج سيليكات الألمنيوم Aluminosilicate glass ومُقَسَّى كيميائيًا . يستخدم الزجاج المقسى كيميائيًا على نطاق واسع في الالواح الشمسية وكذلك في الهواتف الذكية .

لقد وجد أن غياب أيونات الصوديوم Na ions في منطقة السطح يقمع بشكل كبير التحلل الناجم المحتمل PID , حتى باستخدام نفس الخلايا التي تظهر تدهورًا شديدًا باستخدام زجاج الصودا والجير التقليدي Soda-lime glass .

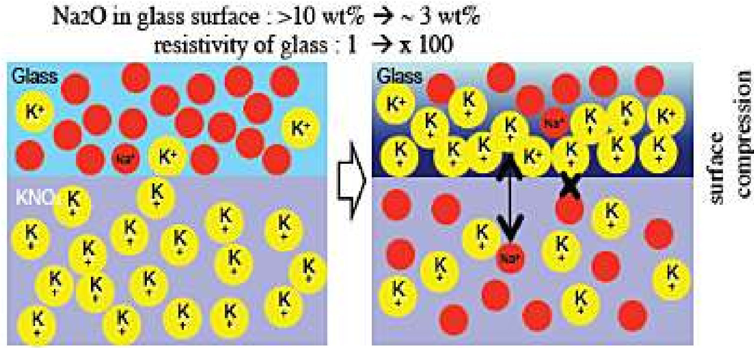
تم إجراء إختبارللتحقق من تأثير إستخدام الزجاج المخفف كيميائياً PID-free glass على أداء خلايا الطاقة الشمسية , بعد 96 ساعة من تطبيق 1000 فولت على الخلية ، بإستخدام وحدتين كهروضوئية من اربع خلايا شمسية لكل وحدة , أحدها تستخدم زجاج تقليدي و الاخرى تستخدم زجاج مخفف كيميائياً PID-free .

تُظهر الوحدة ذات الزجاج التقليدي تدهورًا في الطاقة بأكثر من 90٪ ولا يتبقى سوى 10٪ من الطاقة ، في حين أن الوحدة ذات الزجاج المقسى كيميائيًا لا تظهر أي تدهور مع الاحتفاظ بأكثر من 99.5٪ من الطاقة .

يتم منع إنتقال ايونات الصوديوم Na إلى رقاقة السيليكون باستخدام الزجاج المقسى كيميائيًا PID-Free Tempered Glass .

الزجاج المقسى كيميائياً Chemically Tempered Glass

يُغمر الزجاج في حمام يحتوي على نترات البوتاسيوم Potassium nitrate . يتم تبادل أيونات الصوديوم Na Sodium ions الموجودة على السطح الزجاجي مع أيونات البوتاسيوم K Potassium ions من المحلول .



مخطط الزجاج و حمام محلول نترات البوتاسيوم , قبل (يسار)

, و بعد (يميناً) التقسية الكيميائية

لا تظهر الوحدات المزودة بزجاج مقسّى كيميائيًا chemically tempered glass أي تدهور no degradation مع الاحتفاظ بأكثر من 99.5٪ من الطاقة .

3 – 4 طبقة أسيتات فينيل الإيثيلين Ethylene Vinyl Acetate EVA

في صناعة الطاقة الشمسية ، يكون التغليف الأكثر شيوعًا هو أسيتات فينيل الإيثيلين المتصالب (EVA) . بمساعدة آلة التصفيح Lamination machine ، يتم تصفيح laminated الخلايا بين أغشية من مادة EVA في فراغ ، والذي يكون تحت الضغط . يتم إجراء هذا الإجراء في درجات حرارة تصل إلى 150 درجة مئوية . تتمثل إحدى عيوب طبقات EVA في أنها ليست مقاومة للأشعة فوق البنفسجية not UV-resistant وبالتالي فإن الزجاج الأمامي الواقي مطلوب لفحص الأشعة فوق البنفسجية .



بمجرد أن يتم تصفيح laminated صفائح الـ EVA ، تلعب صفائح أسيتات فينيل الإيثيلين EVA sheets دورًا مهمًا في منع الرطوبة والأوساخ من اختراق الألواح الشمسية . وبمساعدة EVA أيضًا ، "تطفو" الخلايا الشمسية بين الزجاج والطبقة الخلفية ، مما يساعد على تليين الصدمات والاهتزازات وبالتالي حماية الخلايا الشمسية ودوائرها .

خصائص أسيتات فينيل الإيثيلين (EVA)

المتانة Durability

يُعرف طبقة EVA عالي الجودة بمتانة ممتازة ، وأيضًا في الظروف الجوية الصعبة ، مثل ارتفاع درجة الحرارة والرطوبة العالية.

الترابط Bonding

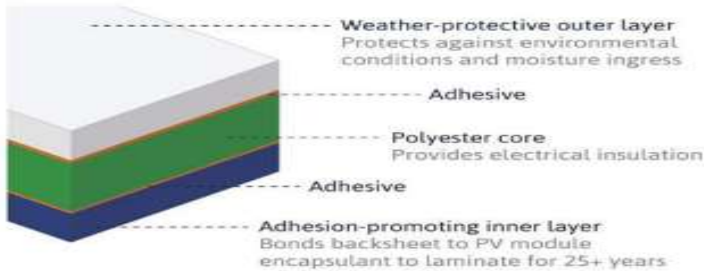
في ظل الظروف المناسبة ، سيكون لطبقة EVA رابطة لاصقة ممتازة Excellent Adhesive Bonding بالزجاج الشمسي Solar Glass (وليس الزجاج القياسي ، لأن الزجاج الشمسي له سطح خشن) . ترتبط EVA أيضًا بشكل جيد جدًا بالطبقة الخلفية Back Sheet .

الخاصية البصرية Optical property

تشتهر EVA بشفافيتها الممتازة Excellent Transparency . هذا يعني أن الإرسال البصري Optical transmission مقبول ولا يمنع الكثيرمن أشعة الشمس التي تحاول الوصول إلى الخلايا الشمسية . في الوقت الحاضر ، يستخدم العديد من الشركات المصنعة خلفية شفافةً ، مما يؤدي إلى شفافية بين الخلايا نتيجة لذلك . يُعرف هذا النوع من الوحدات شبه الشفافة semi-transparent .

4 – 4 الطبقة الخلفية Back Sheet

تحتوي معظم الطبقات الخلفية Back sheets على طبقات متعددة multiple layers ، ولكن هناك أيضًا طبقات خلفية أحادية الطبقة single layer مستخدمة في الوحدات الكهروضوئية . تحتوي الألواح الخلفية الكهروضوئية المستخدمة على نطاق واسع على طبقات تعتمد على البوليمرات مثل البولي إيثيلين تيريفثاليت (PET) ، فلوريد البولي فينيل (PVF) ، فلوريد البولي فينيلدين (PVDF) والبولي أميد (PA) بسماكات تتراوح من 30 إلى 270 ميكرومتر . تلعب الطبقة الخلفية للألواح الشمسية دورًا مهمًا في حماية الوحدة الكهروضوئية من الإجهاد ، وبالتالي فإن المتانة طويلة المدى للصفائح الخلفية أمر بالغ الأهمية .



Typical structure of multi-layers back sheet

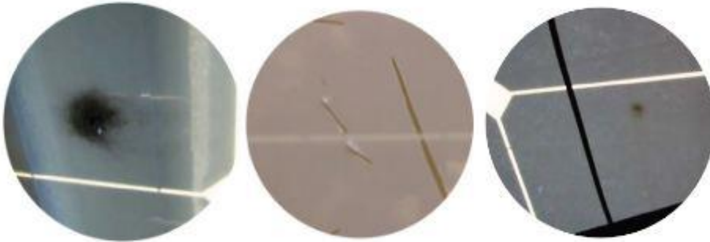
يتم وضع الطبقة الخلفية للوحة الشمسية تحت ضغط ميكانيكي و بيئي متكرر , ولذا يجب أن تؤدي الغرض منه جيدًا لضمان طول العمر الكلي للوحة بأكملها . تحتوي الوحدات الكهروضوئية النموذجية (PV) على بنية الطبقة الموضحة في الصورة أعلاه . يتم استخدام اللوح الخلفي ، المصنوع عادةً من بوليمر أو مزيج من البوليمرات ، لتغطية الجزء الخلفي من الوحدات الكهروضوئية الشمسية . وتتمثل الوظيفة الرئيسية لهذه الطبقة في توفير عزل كهربائي للدوائر الداخلية مع البيئة الخارجية . لذلك ، قد يتسبب الضرر في حدوث مخاطر جسيمة على السلامة .

الإخفاقات الميدانية للطبقة الخلفية Back sheet وآثارها على أداء اللوح الشمسي :

في السنوات الأخيرة ، ازداد الفشل الميداني للصفائح الخلفية back sheets بمعدل ينذر بالخطر . وتشمل هذه التشققات (الطبقة الداخلية أو الخارجية) ، والتشقق والأصفرار . تظهر الملاحظات الميدانية زيادة معدلات تدهور الطبقة الخلفية بمرور الوقت مع جميع أنواع مواد الطبقة الخلفية . وقد أشارت التقارير إلى أن الإخفاقات الميدانية لنوع PA من الطبقة الخلفية تصل إلى 95٪ في ست سنوات فقط من التشغيل .

نظرًا لأن الألواح الخلفية مصممة للعمل كعازل ، فإن الخلل أو الفشل عادة ما يؤدي إلى تأثير ضار على أداء الوحدة الكهروضوئية . تعتبر أخطاء التأريض بسبب انخفاض مقاومة العزل هي النتيجة الأكثر شيوعًا لفشل الطبقة الخلفية . وهو ما يؤدي غالبًا إلى تعثر العاكس ، مما يتسبب في فقد طاقة كبير . بالإضافة إلى فقدان الأداء ، يمكن أن تؤدي أعطال التأريض أيضًا إلى مشكلات تتعلق بالسلامة ، مما قد يؤدي إلى حدوث خطر حريق للنظام بأكمله . خطيربشكل خاص على الأنظمة الكهروضوئية الكبيرة ، حيث يمكن أن يمر تيار التسرب دون أن يلاحظه أحد لفترة طويلة بسبب نطاق حساسية مكونات اكتشاف الأعطال .

يمكن أن يؤدي تكسير وتفكيك الطبقة الخلفية أيضًا إلى تآكل أشرطة توصيل وربط الخلايا Ribbon connections وأشرطة التوصيل busbars داخل الدائرة الداخلية. سوف يتسبب التآكل في ظهور نقاط ساخنة hot spots مما يعني أن الطاقة يتم تبديدها على شكل حرارة مما يؤدي إلى فقد إضافي للطاقة .



Examples showing module field failures

اختبار وفحص وكشف تدهور الطبقة الخلفية

تم تصميم معيار شهادة الوحدة الكهروضوئية IEC 61215 ومعيار السلامة IEC 61730 لاختبار الوحدات الكهروضوئية ضد الإخفاقات المبكرة ولا تحاكي الضغوط البيئية التي قد تواجهها الوحدات الكهروضوئية في هذا المجال . مع التقدم في اختبار الموثوقية للوحدات الكهروضوئية والمواد ، يمكن الآن إخضاع الطبقة الخلفية لاختبارات إجهاد مجمعة ومتسلسلة للكشف عن حالات فشل مشابهة لتلك التي لوحظت في هذا المجال .

عادةً ما يتم تحديد تدهور الطبقة الخلفية وفشل الوحدات الكهروضوئية في الميدان من خلال الفحص البصري . اعتمادًا على مستوى التحلل ، يمكن إجراء اختبار فرك Rubbing test باستخدام مادة عازلة . قبل القيام بذلك ، يجب عزل سلسلة الخلايا The String عن الدائرة الكهربائية . يمكن أيضًا استخدام التصوير الحراري لتحديد النقاط الساخنة الناتجة عن التآكل أو التشوه الناتج عن عيب في الطبقة الخلفية . يمكن استخدام هذا بالاقتران مع التصوير عالي الدقة باستخدام طائرات بدون طيار لالتقاط التشويش المحتمل المرئي من الجانب الأمامي للوحدة الكهروضوئية .

يمكن أيضًا تحديد نوع الطبقة الخلفية المستخدم في الوحدة النمطية الكهروضوئية و التدهور (إن وجد) باستخدام مطيافية فورييه لتحويل الأشعة تحت الحمراء (FTIR) Fourier Transform Infrared في المجال ، وهي تقنية تستخدم لتحديد المواد البوليمرية. يستخدم ضوء الأشعة تحت الحمراء لمسح العينات واكتشاف الخصائص الكيميائية للمادة .

4 – 5 موصلات خلايا الطاقة الشمسية Solar Busbars

يتم تعدين الخلايا الشمسية السيليكونية التقليدية بشرائط رقيقة مستطيلة الشكل thin rectangular-shaped strips مطبوعة على السطح الأمامي والخلفي للخلية الشمسية . يشار إلى شرائط التلامس الأمامية والخلفية هذه على أنها قضبان التوصيل ، أو busbars . القضبان الشمسية solar busbars لها غرض واحد بسيط ولكنه مهم : إنها توصل التيار المباشر الذي تنتجه الخلية الشمسية من الفوتونات الواردة .

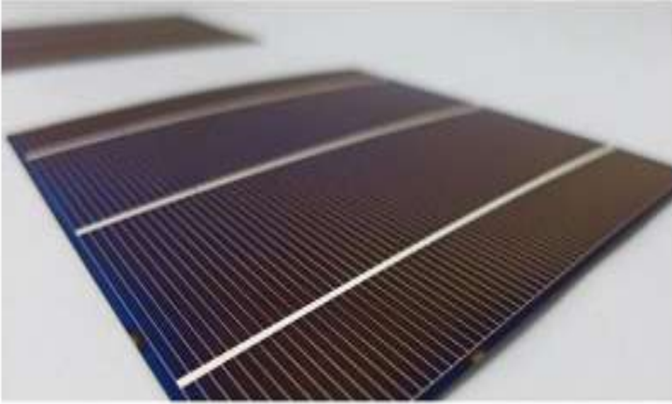
عادةً ما تكون قضبان توصيل الخلايا الشمسية مصنوعة من النحاس المطلي بالفضة . يعد الطلاء الفضي ضروريًا لتحسين توصيل التيار (السطح الأمامي) وكذلك لتقليل الأكسدة (السطح الخلفي) .

عموديًا على قضبان التوصيل busbars توجد أصابع الشبكة المعدنية والرقيقة جدًا super-thin grid fingers ، والتي تسمى أيضًا أصابع التلامس أو contact fingers , وتعرف ببساطة : إنها أصابع fingers متصلة بواسطة قضيب التوصيل busbar .

تُجمع الأصابع fingers التيار المتولد وتسلمه إلى القضبان busbars . يتم لحام أسلاك التجميع Tab wires بقضبان التوصيل busbars لتوصيل سلسلة من الخلايا string of cells وبالتالي تجميع التيار الكهربائي لسلسلة واحدة .

يتم توصيل مجموعات سلاسل الخلايا cell strings بالتوازي بواسطة أسلاك ناقلة bus-wires والتي تقوم بعد ذلك بتوصيل الطاقة التراكمية من جميع الخلايا إلى صندوق التوصيل junction box .

توضح الصورة أدناه خلية PV سيليكون متعددة الكريستالات بها 3 أشرطة (أفقية) busbars و أصابع (رأسية) fingers :



Polycrystalline silicon solar cell: busbars and fingers

في الأساس ، يتميز سطح الخلية الشمسية التقليدية بشبكة من هذه الأصابع الدقيقة التي تجمع التيار وتوصله الى قضبان توصيل التيار . تتم طباعة هذه الموصلات - القضبان والأصابع - على السطح عبر تقنية تسمى طباعة السطح screen printing .

المفتاح في تصميم وإنتاج الخلايا الشمسية التقليدية هو تحقيق التوازن الأمثل بين :

خسائر مقاومة القضبان والأصابع busbars and fingers resistance losses :

تحدث بسبب استخدام عدد قليل جدًا من الملامسات المعدنية metallic contacts ، وبالتالي خلق مسافات أكبر بينهم .

وخسائر التظليل والانعكاس shading and reflection losses :

هو نتيجة عدد كبير جدًا من الموصلات contacts على سطح الخلية ، مما يمنع الضوء بشكل أساسي من دخول الخلية الشمسية .

تتمثل العوامل المؤثرة في ارتفاع وعرض قضبان التوصيل busbar ، وعرض الأصابع fingers : المسافات بين الأصابع والقضبان بالإضافة إلى نوع المعدن وجودته .

4 – 6 سلك التوصيل الشمسي وسلك التجميع : solar bus wire and tab wire

نظرًا لأن الخلايا الشمسية الفردية تنتج جهدًا منخفضًا ومن أجل الحصول على جهد مناسب ، يجب توصيل الخلايا الشمسية في سلسلة لتشكيل صفوف . لتوصيل الخلايا الفردية في السلسلة وأيضًا بمقاومة سلسلة منخفضة ، يتم لحام شريط التلامس المعدني – Tab wire - إما يدويًا أو ألياً بشريط التوصيل - busbar - . في نهاية سلسلة الخلايا يربط سلك الناقل bus wire هذه الصفوف بالتوازي . ليتم جمع تيارات سلاسل الخلايا المرتبطة .

سلك التجميع (Tab wire or Tabbing wire) عبارة عن سلك نحاسي مسطح Flat Copper Wire . يتم تحضيره عادة عن طريق تسطيح الأسلاك النحاسية المستديرة في شكل مسطح . يتم إعطاء اللب النحاسي طبقة لحام solder coat للسماح بسهولة لحام الخلايا .

تتوفر بسُمك وعرض مختلف ، من حوالي 1 مم إلى حوالي 2 مم للعرض . تتراوح السماكات من حوالي عُشر المليمتر إلى حوالي عُشرين من المليمتر .

يتم استخدام سلك الناقل bus wire لربط صفوف الخلايا على التوازي . إنه أيضًا ، مثل سلك التجميع tab wire ، مصنوع من مقطع عرضي مسطح flat cross-section . نظرًا لأنه يجب أن يحمل مجموع تيارات الصف ، يجب أن يكون للسلك الناقل bus wire بسمك وعرض أكبر للسماح بمقاومة أقل لكل وحدة طول من سلك التجميع tabbing wire .

مثل الـ tabbing wire ، فهو مصنوع أيضًا من سلك نحاسي دائري من خلال عملية درفلة Rolling process ومغلف بطبقة من اللحام layer of solder للسماح باللحام السهل .

تتراوح السماكة المتاحة عادة من حوالي 0,15 مم إلى حوالي 0,35 مم . يتوفر بعرض يتراوح من 4 مم إلى 6 مم تقريبًا . في واقع الأمر ، فإن tabbing wire و bus wire للوحدات الشمسية هي نفسها بشكل عام فقط يجب أن يحمل (bus wire) تيار الناقل (bus current) ، والذي يكون أكبر بعدة مرات من تيار السلسلة row current . ومن ثم يجب أن يكون سلك الناقل أكثر سمكًا و أوسع نطاقاً . كلاهما يباع على شكل لفات بأحجام مختلفة .

4 – 7 أسلاك التوصيل ـ اتجاهات التنمية والمستقبل

يتضمن تصميم الخلايا الشمسية الأولى 2 أو 3 أشرطة busbars مطبوعة على الخلية . نظرًا لأن العمل على تحسين تقنيات الخلايا الشمسية الحالية أصبح أكثر صعوبة حيث يكافح الباحثون للضغط على المزيد من الخلايا التقليدية ، ولا تزال تقنيات الخلايا الشمسية الجديدة المذهلة والمستقرة غير موجودة في المشهد السائد ، فإن الاتجاه المتزايد في الصناعة هو الرجوع إلى التفكير في تصميم الخلية وتصنيعها لزيادة الكفاءة والموثوقية .

الأساليب متعددة الجوانب ليست موجهة فقط لأداء الخلية وموثوقيتها ولكن أيضًا بشكل كبير نحو تقليل تكاليف المواد ـ خاصة فيما يتعلق بالعجينة الفضية المستخدمة في صنع قضبان التوصيل التقليدية ـ بالإضافة إلى التحسينات الجمالية .

دعونا نلقي نظرة على بعض الأساليب :

خلايا ذات أسلاك توصيل متعددة Multi busbar cells

تعد خلايا قضبان (أسلاك) التوصيل المتعددة multi-busbar cells ، بشكل ملحوظ من 5 الى 12 موصل (5 – 12 BB) ، واحدة من الاتجاهات الرئيسية في تصميم الخلايا الشمسية والوحدة النمطية .

تركز العديد من الشركات المصنعة للوحدات الكهروضوئية الكبيرة ، بشكل متزايد على إنتاجها على وحدات الطاقة الكهروضوئية باستخدام الخلايا الشمسية ذات التلامس الخلفي (PERC) مع جهات اتصال أمامية (5 – 12 BB) . هذا العدد المتزايد من الموصلات يقلل من خسائر المقاومة الداخلية ، والتي ترجع إلى المسافة الأقل بين الموصلات . على الرغم من أن العدد الأكبرمن الموصلات تزيد من تظليل الخلية الشمسية ، إلا أن الأداء العام للخلايا متعددة الموصلات أفضل بكثير من خلايا (2 – 3 BB) السابقة .

نظرًا لأن الشقوق الصغيرة تحدث عادةً بين قضبان التوصيل ، فإن تأثير هذه الشقوق يتم تقليله نحو شرائح الخلايا الأصغر المتأثرة بين قضيبين . وبالتالي ، بالمقارنة مع الخلايا التقليدية 2BB و 3BB ، فإن الموثوقية طويلة المدى لخلية متعددة القضبان حتى في حالة حدوث تشققات صغيرة تكون أعلى . أيضًا ، من ناحية التكلفة ، يسمح التصميم متعدد القضبان مع قضبان التوصيل الرقيقة بتخفيض إجمالي للعجينة الفضية باهظة الثمن .

خلايا خالية من الموصلات Busbar-less Cells

على عكس نهج متعدد الموصلات ، فإن بعض الشركات المصنعة تسير في طريق بدون موصلات ، تستخدم قضبان التوصيل الصفرية والتي يطلق عليها Zero-wire design أي إن تصميمها بدون أسلاك , شرائح الخلايا الشمسية المتداخلة , التي ترتبط ارتباطًا كهربائيًا ببعضها البعض بشكل مباشر .

مزايا الخلايا الخالية من الموصلات واضحة :

- أفضل بكثير كنسبة إنتاج الطاقة .
- تصميم أكثر مرونة لحجم الوحدة - يقتصر تصميم الوحدة التقليدية على حجم الخلية ومتطلبات التباعد
- انخفاض كبير في التظليل
- عيوب متأصلة في الخلية أقل احتمالية مثل التشققات الدقيقة ، والتي تحدث غالبًا بسبب لحام الخلية
- التوفير في تكاليف مواد اسلاك التوصيل

بينما تركز تصميمات الموصلات المتعددة و الموصلات الأقل على زيادة الأداء والموثوقية ، تركز المناهج الأخرى على تقليل تكاليف المواد ، وذلك في المقام الأول عن طريق تقليل تكلفة المعدن الفضي silver metallization لأسلاك التوصيل . نهج آخر يتم الترويج له حاليًا هو الاستبدال الكامل للفضة لمعدن الخلايا الشمسية بمواد بديلة مثل القصدير أو النيكل .

أشرطة توصيل ذات نمط الخط المتقطع Dash-line Pattern Busbars

لقد توصلت الصناعة في السنوات الأخيرة إلى بديل أكثر فعالية من حيث التكلفة لقضبان التوصيل التقليدية الكاملة : قضبان نقل بنمط خط متقطع ، مما يقلل من استخدام عجينة الفضة باهظة الثمن . توجد أنواع مختلفة من أشرطة التوصيل بنمط خط متقطع dash-line pattern busbars ، مثل dash-3 ، و dash-5 ، و dash-6 ، وحتى dash-8 .



Cells with dash-line pattern busbars

نظرًا لأن تخفيضات التكلفة غالبًا ما تسير جنبًا إلى جنب مع تخفيضات الجودة والموثوقية على المدى الطويل ، يمكن أيضًا ملاحظة ذلك بالنسبة لاختراعات الموصلات بنمط خط متقطع .

أظهرت الأبحاث أن قضبان التوصيل ذات النمط المتقطع dash-pattern busbar أكثر عرضة للتشقق المحتمل وتدهور الطاقة - وهي المشكلات التي تزداد مع عدد الخطوط المتقطعة dash-lines ، مع تراكم الإجهاد الحراري والتشقق الذي يحدث في زوايا شريط التوصيل وبالتالي يزداد مع عدد التقطعات dashes .

تحسين سلك التجميع : أسلاك مستديرة وأسلاك ملونة

عند تحسين أداء الخلايا الشمسية ، توفر أسلاك التجميع **tabbing wires** أيضًا مجالًا للتحسين . يتضمن أحد هذه التحسينات استخدام أسلاك التجميع المستديرة **round tab wire** ، والتي - بالمقارنة مع الأسلاك المستطيلة الشكل - تأتي بتظليل أقل بسبب مساحتها الصغيرة .

إن استخدام أسلاك التجميع الملونة **colored tab wire** له أسباب جمالية في المقام الأول وقد توصل الباحثون وكذلك الشركات المصنعة إلى حلول في هذا الصدد لتحسين المظهر العام للوحدات الشمسية .

الفصل الخامس

تقنيات الخلايا الكهروضوئية

5 – 1 تطور الخلايا الشمسية

التأثير الكهروضوئي يعني حرفيًا توليد جهد عند التعرض للضوء . لوحظت هذه الظاهرة لأول مرة من قبل الفيزيائي الفرنسي إدموند بيكريل على خلية كهروكيميائية في عام 1839 ، بينما لاحظها العالمان البريطانيان W.G. Adams و R.E. على جهاز الحالة الصلبة مصنوع من السيلينيوم في عام 1876 . (9)

منذ الخمسينيات فصاعدًا ، كان هناك تقدم سريع في أداء الخلايا الشمسية التجارية من <1٪ إلى > 24٪ وكان السيليكون بمثابة "حصان العمل" في الصناعة الكهروضوئية منذ ذلك الحين . يظهر تطور خلايا السيليكون الشمسية في الشكل أدناه . (9)

كانت الخلايا الشمسية السيليكونية الأولى التي أظهرها راسل أوهل Russell Ohl من مختبرات بيل خلال الأربعينيات من القرن الماضي مبنية على تقاطعات طبيعية تشكلت من فصل الشوائب أثناء عملية التبلور . كانت كفاءة الخلايا أقل من 1٪ بسبب عدم التحكم في موقع الوصلة وجودة مادة السيليكون . ومنذ ذلك الحين ، تُستخدم التسمية لتسمية المناطق (النوع p: الجانب الذي هو معرض للإضاءة و النوع n: الجانب الآخر) الذي قدمه Ohl في اصطلاحات تسمية الخلايا الشمسية .

خلال الخمسينيات من القرن الماضي ، كان هناك تطور سريع في عملية الانتشار ذات درجة الحرارة المرتفعة للمشوبات dopants في السيليكون . أظهر بيرسون و فولر و شابلن من مختبرات بيل وجود خلية شمسية فعالة بنسبة 4.5٪ مع الشوائب doping القائمة على الليثيوم ، والتي تحسنت إلى 6٪ مع انتشار البورون Boron diffusion . كان للخلية الشمسية "احاطة wrap-up " حول الهيكل (الشكل b)(9) مع وجود كل من الموصلات على الجانب الخلفي لتجنب خسائر التظليل ، ولكنها أدت إلى خسائر مقاومة أعلى بسبب الهيكل الملتف . بحلول عام 1960 ، تطور هيكل الخلية كما هو موضح في الشكل c .(9)

نظرًا لأن التطبيق كان لاستكشافات الفضاء ، فقد تم استخدام ركيزة عالية المقاومة تبلغ 10 Ω.cm للحصول على أقصى مقاومة للإشعاع .

تم استخدام ملامسات التبخير الفراغي vacuum evaporated contacts على كلا الجانبين ، بينما تم استخدام طلاء أول أكسيد السيليكون SiO كطلاء مضاد للانعكاس (ARC) على الجانب الأمامي Front Side FS .

في أوائل السبعينيات ، وجد أن وجود الألمنيوم الملبد sintered Aluminum على الجانب الخلفي أدى إلى تحسين أداء الخلية من خلال تشكيل سطح مشوب بشكل كبير heavily doped interface تُعرف باسم حقل السطح الخلفي Back Surface Field (Al-BSF) والتخلص من الشوائب .

يقلل Al-BSF من إعادة تركيب Recombination لحاملات الشحنة Carriers على الجانب الخلفي وبالتالي يحسن الجهد والاستجابة الطيفية ذات الطول الموجي الطويل .

أدى تنفيذ الأصابع الدقيقة والمتقاربة finer and closely spaced fingers إلى تقليل الحاجة إلى تشويب الوصلة doping junction .

تم استخدام ARC لثاني أكسيد التيتانيوم (TiOx) وتم اختيار سمكه لتقليل الانعكاس لأطوال موجية أقصر وإعطاء مظهر بنفسجي للخلايا الشمسية .

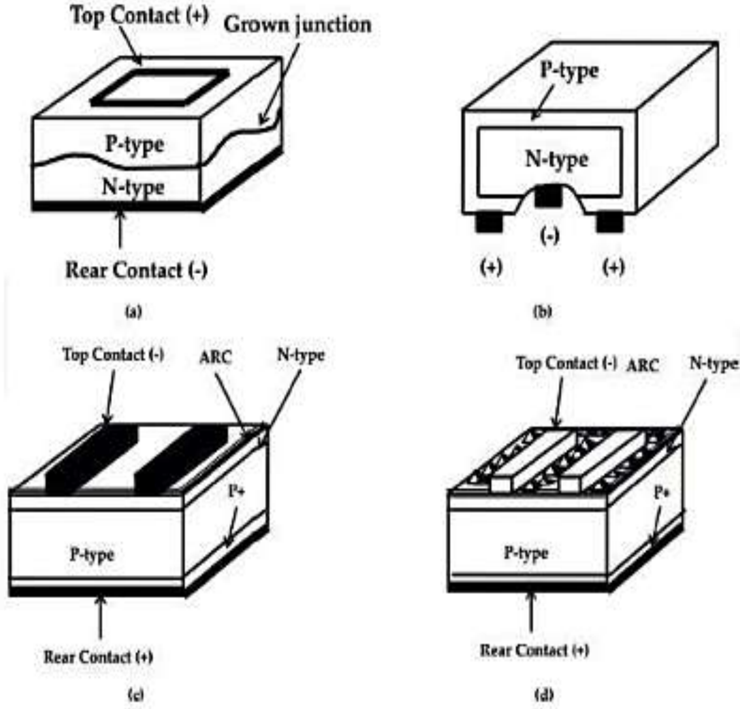
تم إجراء مزيد من التحسين من خلال تشكيل السطح Texturing للرقائق Wafers . أدى تشكيل السطح إلى تحسين محاصرة الضوء وإعطاء الخلايا مظهرًا داكنًا .

تظهر بنية الخلية المحسّنة في الشكل d .(9) . في عام 1976 ، أظهر Rittner و Arndt خلايا شمسية بكفاءات تقترب من 17٪ .

حققت الخلية الشمسية الباعثة المنفعلة (PESC) علامة فارقة في كفاءة 20٪ في 1984- 1986 . كانت منطقة التلامس المعدني / السليكون 0.3 ٪ فقط في خلايا PESC ، بينما تم استخدام طبقة مزدوجة ARC من ZnS / MgF2 في كل من الهياكل الخلوية . في عام 1994 ، تم إثبات خلية الباعث الخلفي المنتشر محليًا (PERL) بكفاءة 24 ٪ .

بالمقارنة مع خلية PESC ، فإن خلية PERL لديها أهرامات مقلوبة على السطح الأمامي FS لتحسين محاصرة الضوء والتخميل القائم على الأكسيد على كلا الجانبين .

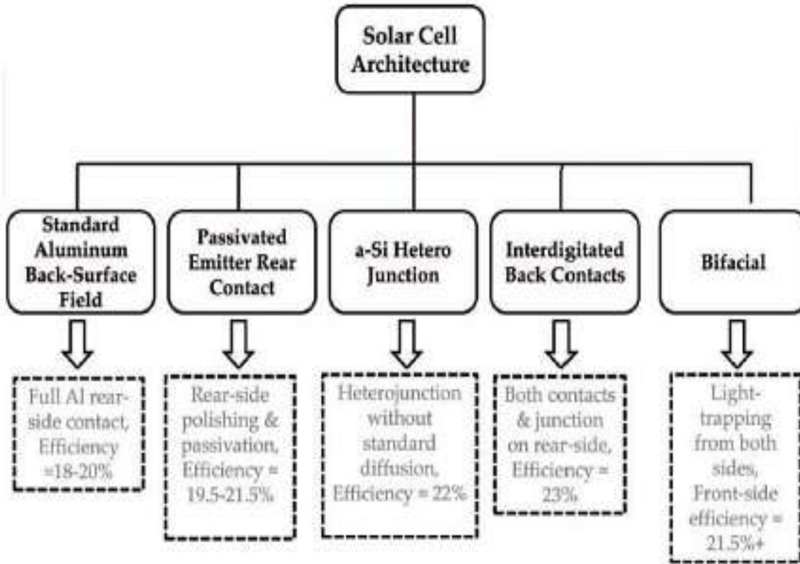
طبقة تخميل الأكسيد على الجانب الخلفي حسنت أيضًا الانعكاس الداخلي لطول الموجة الطويل وبالتالي استجابة الطيف . بالإضافة إلى أبنية الخلايا الشمسية المتطورة ، كان هناك أيضًا تطور مستمر في مجال التصنيع من حيث زيادة الإنتاجية وخطوات العملية المحسنة وخفض التكاليف .



Evolution of silicon solar cells. (a) 1941: Solar cell reported with grown-in junction, (b) 1954: Solar cell p-n junction formed with dopant diffusion, (c) 1970: Violet cell with Aluminum back-surface field, (d) 1974: Black cell with chemically textured surface [3].

يظهر تصنيف واسع لأنواع مختلفة من الخلايا الشمسية جنبًا إلى جنب مع نطاقات الكفاءة في الشكل أدناه .(9). تعد تقنية مجال السطح الخلفي للألمنيوم القياسي (Al-BSF) واحدة من أكثر تقنيات الخلايا الشمسية شيوعًا نظرًا لعملية التصنيع البسيطة نسبيًا .

يعتمد على ترسيب طبقة ألمنيوم كاملة على السطح الخلفي (full rear-side RS Al deposition) من خلال عملية طباعة السطح screen-printing و تشكيل (P^+ BSF) الذي يساعد على صد الإلكترونات من الجانب الخلفي rear-side من الركيزة من النوع p وتحسين أداء الخلية .



Broad classification of different types of solar cell.

تعمل الخلية الشمسية ذات التلامس الخلفي للباعث الخامل (PERC) على تحسين بنية Al-BSF من خلال إضافة طبقة تخميل الجانب الخلفي لتحسين تخميل الجانب الخلفي rear-side passivation والانعكاس الداخلي . أكسيد الألومنيوم مادة مناسبة لتخميل السطح الخلفي RS .

إن تقنيات الخلايا الثلاث المتبقية هي بشكل أساسي تقنيات عالية الكفاءة تعتمد على ركائز السيليكون Si من النوع n .
تحتوي الخلية الشمسية غير المتجانسة a-Si heterojunction solar cell على طبقات a-Si على الجانب الأمامي FS و الجانب الخلفي RS من ركيزة السيليكون Si من النوع n لتشكيل "وصلات غير متجانسة heterojunction" على عكس وصلة p-n junction التقليدية القائمة على الانتشار عالي الحرارة .

تسمح هذه التقنية بالمعالجة في درجات حرارة منخفضة ، ولكنها حساسة جدًا لجودة واجهات السطح surface interfaces .

في تصميم الخلايا الشمسية ذات التلامس الخلفي البيني (IBC) Interdigitated Back Contact ، توجد كلا الموصلات على الجانب الخلفي RS مما يلغي خسائر تظليل الموصلات للجانب الأمامي FS . عادةً بالنسبة للخلايا الشمسية IBC ، ستكون الوصلة موجودَة أيضًا على الجانب الخلفي .

الخلايا ثنائية الوجه Bifacial cells ، كما يوحي الاسم ، يمكنها التقاط الضوء من جانبي الخلايا الشمسية .
يستلزم ذلك أن يكون للجانب الخلفي أيضًا موصلات بنمط الشبكة grid-pattern contacts لتمكين جمع الضوء .

5 – 2 تقنيات الخلايا الشمسية

في البدأ سنوضح فكرة مبسطة عن كيفية عمل الخلية الشمسية كمبدأ عام لنتمكن من رسم صورة واضحة لما يحدث داخل الخلية الشمسية ومن ثم تسهل فهم تقنيات الخلايا الشمسية وتطورها .

تتكون الخلايا الشمسية من عدة طبقات ذات سمك صغير جدا في نطاق الميكرونات (الميكرون هو جزء من مليون من المتر). في منتصف الخلية نجد المادة الفعالة أو المادة الماصة للضوء التي تمتص ضوء الشمس وتنتج الإلكترونات.
لكن الإلكترون يحمل شحنة سالبة، وإذا ترك مكانه وتحرك فالمكان الفارغ يحمل شحنة موجبة نسميها فجوة، ومن ثم فإنه بعد سقوط الضوء يتكون داخل المادة الماصة للضوء سيل من الشحنات السالبة وسيل مماثل من الشحنات الموجبة.

وهذا الفيض من الشحنات يتحرك عشوائيا داخل المادة، ومن ثم إذا اصطدم إلكترون (شحنة سالبة) بفجوة (شحنة موجبة) سيفقد الإلكترون الطاقة التي اكتسبها ويعود إلى مستواه الأصلي، وهو ما يسمى أعادة التركيب (الأتحاد) , وسنفقد الإلكترونات التي نحتاج إليها لتوليد التيار الكهربائي.

لذلك يتم وضع طبقة من مادة مصممة بطريقة معينة وفي مستوى طاقة معين لامتصاص الإلكترونات ومادة أخرى ذات مستوى طاقة مناسب لامتصاص الفجوات، ومن ثم تُفرغ المادة الفعالة في المنتصف من الشحنات أولا فأولا، وتستمر عملية إثارة الإلكترونات وتوليد الشحنات وسريانها إلى الطبقات الماصة للشحنات السالبة والموجبة، ومنها إلى الدائرة الخارجية... وهكذا بشكل مستمر.

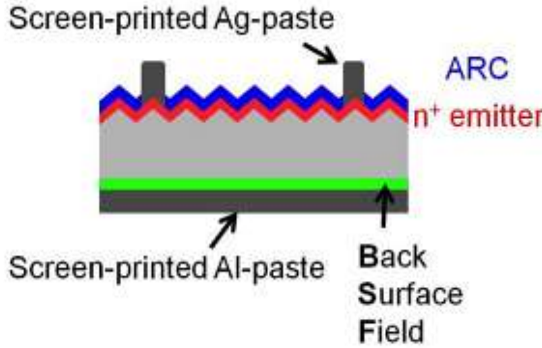
الان سنتكلم بشيء من التفصيل عن تقنيات صناعة الخلايا الشمسية , حيث تم أختيار تقنيات الخلايا الأكثر شيوعاً . وهي : خلايا مجال السطح الخلفي BSF , خلايا تخميل الباعث والخلية الخلفية PERC , الخلية الغير متجانسة SHJ , خلية التلامس الخامل لأكسيد النفق TOPcon , خلايا الاتصال الخلفي المتداخل IBC , خلايا البروفسكايت الشمسية PSC .

بالنسبة لخلايا مجال السطح الخلفي BSF , فقد أستندنا على طرق تصنيعها وخصائصها في الفصول السابقة التي وضحنا فيها طريقة تصنيع الخلية الشمسية لكونها الخلية المعتمدة تجارياً لعقود وكانت هي أساس لظهور الاجيال المتقدمة بالنسبة للخلايا السيليكونية الشمسية اللاحقة لذلك ممكن العودة للفصول السابقة .

وأستعرضنا بشيء من التفصيل لخلايا ال PERC و خلايا TOPcon الشمسية لأستحواذها على الانتاج التجاري لسوق الطاقة الشمسية حالياً . وكذلك خلايا البروفسكايت تعتبر مهمة ولها مستقبل ومن الممكن أن تستحوذ على سوق الطاقة الشمسية في حال تمت معالجة مشاكلها الحالية وخصوصاً مشكلة إنحدار الأداء السريع .

5 – 3 خلية مجال السطح الخلفي (BSF) Back Surface Field :

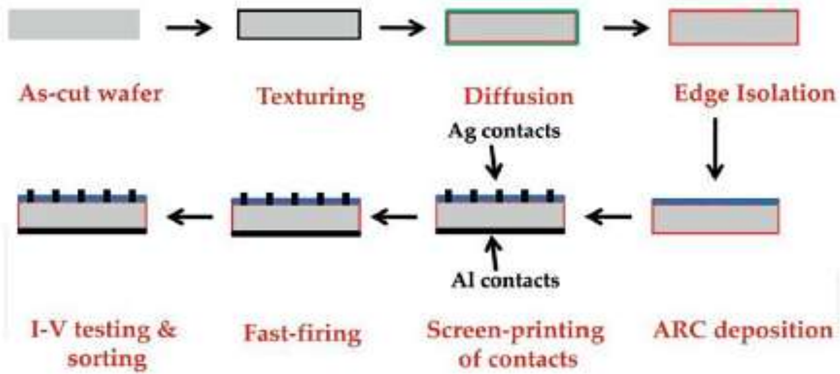
وهي الخلية التقليدية الرئيسية المستخدمة لانتاج الواح الطاقة الشمسية لغاية 2014 وهي من نوع الخلايا P-type .
(1)



حيث يتكون سطح الخلية الخلفي من الالمنيوم P^+ مطعم الالمنيوم بالسليكون ومع استخدام الالمنيوم يكون لدينا ما نسميه تيار التشبع ويعتبر هذا فقد كبير في السطح الخلفي للخلية لذلك يجب تخفيض هذا التيار لدرجات قليلة جدا . لذلك كان التوجه لتقنية ال PERC لتقليل تيار التشبع وبالتالي تقليل الخسائر .

يمكن ترقية خط انتاج الخلايا الشمسية Al-BSF إلى عملية إنتاج خلايا PERC بواسطة أداتين إضافيتين :
ترسيب طبقة التخميل للسطح الخلفي RS rear-side passivation layer
الليزر لفتح التلامس الموضعي على السطح الخلفي RS opening local contacts

يظهر تتابع التصنيع لخلايا Al-BSF الشمسية في الشكل أدناه . التصميم القياسي للخلايا الشمسية التجارية مع نمط الشبكة grid-pattern للسطح الأمامي FS و موصلات كامل السطح الخلفي full-area contacts RS



Manufacturing flow of Al-BSF solar cells.

يمكن الرجوع للفصل الأول القسم (1 – 11 – 1 الى 1 – 11 – 9) حيث توضح عمليات تصنيع وخواص خلايا الـ BSF .

5 – 4 الخلايا الشمسية من نوع PERC Passivated Emitter and Rear Cell

نستعرض الخلايا الشمسية بتقنية التخميل الباعث والخلية الخلفية (PERC) Passivated Emitter and Rear Cell . والتي تم تصنيعها مختبرياً كخلية شمسية من السيليكون في الثمانينيات من القرن الماضي ، والتي أثبتت كفاءة جيدة ولكن لم يتم تداولها تجارياً إلا قبل عدة سنوات بعد أن أخذت المسار الصحيح لتصبح الخلية الشمسية المهيمنة تجارياً بعد التطوير الشامل بالنسبة لعمليات التصنيع و المواد و أدوات الأنتاج .

وخصوصاً إن الخلايا الكهروضوئية نفسها تسير على الطريق الصحيح لتصبح المهيمنة تكنولوجياً على توليد الطاقة , و خفض إنبعاثات غازات الإحتباس الحراري , بأفتراض معدل نمو متوسط للتركيبات الكهروضوئية السنوية 25 % , مع توقع قيم أعلى بكثير لاحقاً .

لعقود كان حوالي 90 ٪ من إنتاج الخلايا الشمسية العالمي بتقنية مجال السطح الخلفي للألمنيوم(Al-BSF) , يوفرهذا التصميم للخلية كفاءة معتدلة وتصنيعًا بسيطًا وموثوقًا ، لذلك تكونت لها خبرة واسعة من حيث أدوات التصنيع والمواد والإجراءات .

تمثل تكلفة تصنيع الخلية (منفصلة عن كلفة أنتاج رقائق السليكون البلوري) حوالي ربع تكلفة الوحدة ، في حين أن تكلفة تصنيع الخلية حوالي نصف تكلفة النظام . وبالتالي ، فإن عملية تصنيع الخلايا تبلغ حوالي ثُمن تكلفة النظام المكتمل . (2)

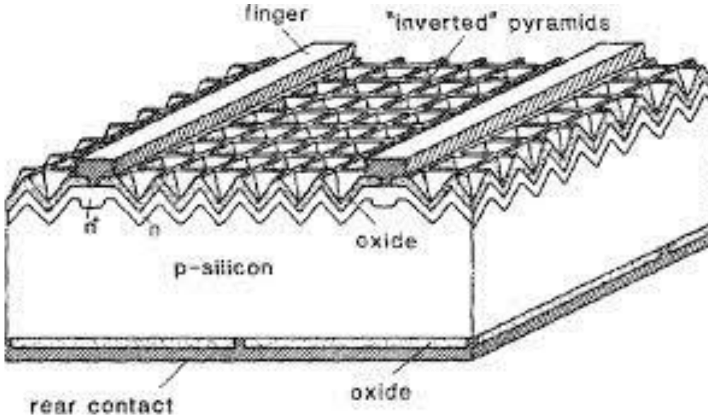
تستمر تكلفة الخلية الشمسية كنسبة من تكلفة النظام الكهروضوئي الكامل في الانخفاض . وذلك , لأن معظم مكونات النظام (مثل النقل , والأرض , والسياج وهياكل الدعم الفولاذية , والأسلاك , وإطارات الألمنيوم , والزجاج) تتمتع بنضج تجاري أكبر من الخلايا الشمسية ، وبالتالي لديها فرص أقل لخفض الأسعار .

نظرًا لأن الزيادة في كفاءة الخلية تزيد من خفض التكلفة من خلال تقليل المساحة التي تشغلها المنظومة . في المقابل ، فإن الانخفاض في تكلفة الخلية لكل متر مربع له تأثير أقل .

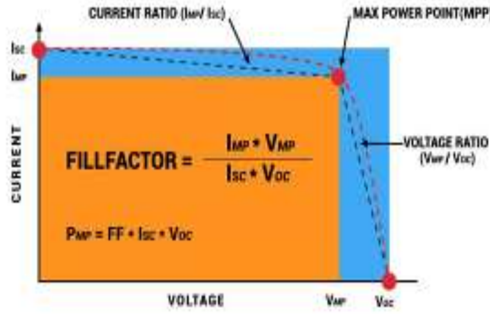
كان الدافع الرئيسي للتحول إلى الخلايا الشمسية بتقنية PERC هو تحسين الكفاءة مقارنة بالخلية الشمسية بتقنية Al-BSF السابقة لها , تتمثل المزايا الرئيسية لخلايا الـ PERC على خلية الـ Al-BSF هو تقليل إعادة التركيب للسطح الخلفي Recombination والتي تسبب تولد تيارات ضائعة مما يؤدي لأنخفاض في جهد الدائرة المفتوحة Voc للخلية الشمسية وبالتالي تسبب بأنخفاض كفاءة الخلية الشمسية . و كذلك تحسين انعكاس السطح الخلفي للخلية الشمسية مما يتيح لأنعكاس كمية أكبر من الأشعاع الشمسي عند سطح الخلية الخلفي وعودتها لداخل الخلية لزيادة توليد التيار .

وفقًا لخارطة طريق التكنولوجيا الدولية للطاقة الكهروضوئية ، شكلت الخلايا الشمسية بتقنية الـ PERC 20 ٪ من الصناعة الكهروضوئية في عام 2017 و وصلت إلى 50 ٪ من الصناعة الكهروضوئية العالمية في عام 2020 وهي مستمرة بالأرتفاع الى يومنا هذا .(3)

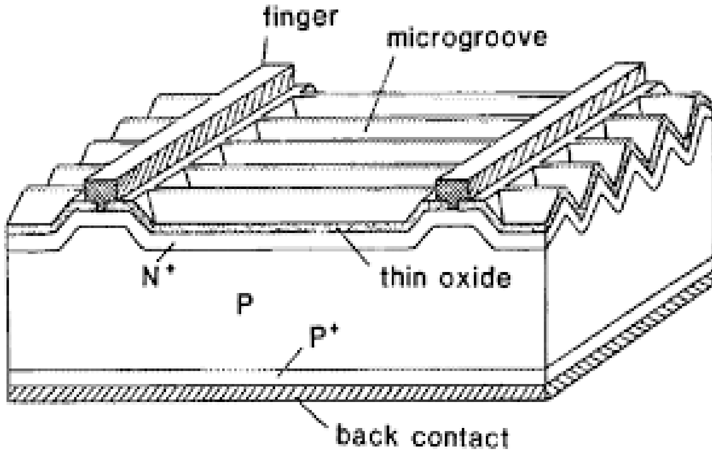
يتكون السطح الخلفي من طبقة من الألمنيوم السبائكي Aluminum Alloyed layer , إضافة حفر دقيق micro grooving على السطح الامامي هرمي الشكل للخلية يساعد في تقليل انعكاس الضوء على السطح الأمامي وبالأضافة الى محاصرة الضوء وبالتالي رفع كفاءة التحويل للخلية . الشكل الاتي لخلية PERC . (50)



تطوير الخلايا الشمسية عالية الكفاءة High-efficiency solar cells أعتمدت مبدأ (تحسين جهد الدائرة المفتوحة Voc للخلية الشمسية أولاً و التيار Current و عامل الملئ Fill Factor FF سوف تتبعها) .



عملية تخميل **Passivation** السطح الأمامي للخلية يكبت عملية أعادة الاتحاد وبالتالي يسمح لجهد الخلية بالأرتفاع V_{oc} . الحد الأدنى لأعادة التركيب(الاتحاد) **Recombination** للموصلات المعدنية للسطح الأمامي للخلية تم تحقيقها عن طريق التقليل لمساحة التلامس , عن طريق حشر طبقة أكسيد تخميل نفقي رقيقة **Thin Passivated Tunnel Oxide** بين السليكون (جسم الخلية) و المعدن , و عن طريق نشرها في المنطقة خلف الموصلات المعدنية و المساحة بين الموصلات المعدنية **Metal Fingers** (والتي تشكل 99 % من مساحة سطح الخلية الأمامي) يتم تخميلها بأكسيد حراري **Thermal Oxide** , والذي يمنع طلاء الفضة التي يطلى بها الموصلات المعدنية من التلامس مع السليكون . كما موضح في الشكل التالي .(49)



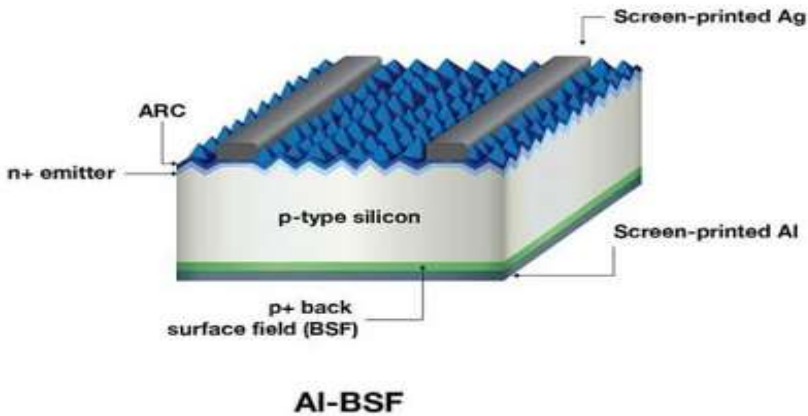
ونتيجة لذلك أرتفع جهد الخلية فوق 650 ملي فولت , مما يدل على أن تخميل السطح الأمامي للخلية front surface passivation كان فعالاً , لذلك تحول الأنتباه الى تقليل أعادة التركيب عند السطح الخلفي للخلية Rear Surface recombination .

السطح الخلفي للخلايا الشمسية السابقة تتكون من سبائك الألمنيوم alloyed Aluminum ما يسمى بمجال السطح الخلفي BSF , مما يحد من زيادة كفاءة الخلية الشمسية بسبب معدلات عملية إعادة التركيب العالية و ضعف الأنعكاس . إن ترسيب أكسيد التخميل Passivation Oxide على المعدن لمعظم السطح الخلفي للخلية من شأنه أن يقلل من إعادة التركيب . (3)

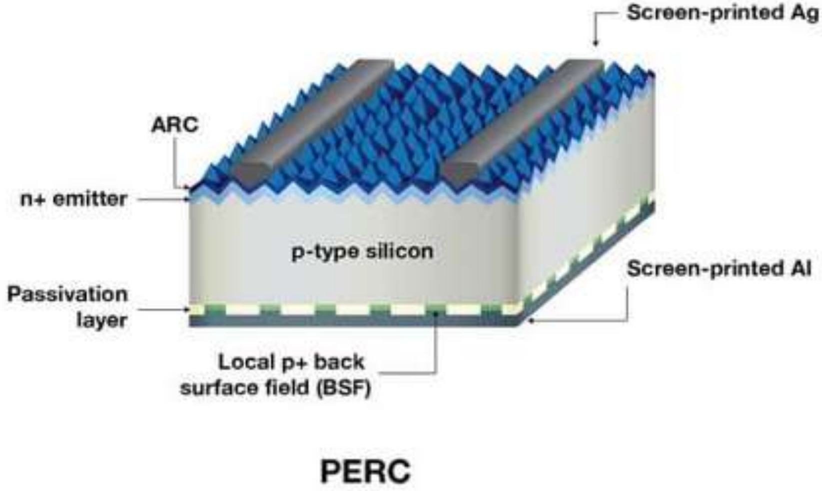
إن تقليل منطقة التلامس بين المعدن والسيليكون Metal - Silicon contact area في الخلف من شأنه أن يقلل من إعادة تركيب السطح الخلفي Rear-surface recombination ، عن طريق المقارنة مع منطقة التلامس المعدنية المنخفضة على السطح الأمامي .

كان أحد الاحتمالات هو التصميم ثنائي الوجه Bifacial الذي يقتصر فيه مساحة المعدن الخلفي على 5 - 10 ٪ من السطح ، مع وجود عازل تخميل يغطي باقي السطح الخلفي . و الأحتمال الاخر هو تمديد المعدن الخلفي عبر السطح الخلفي بالكامل لإنشاء مرآة فعالة ، ولكن لتقييد جزء التلامس المعدني من خلال إضافة عازل التخميل بين السيليكون والألمنيوم . (3)

السمة المميزة لخلايا PERC هي السطح الخلفي للخلية , حيث تم تقليل الفقد الأشعاعي الشمسي و الفقد بسبب أعادة التركيب recombination بشكل كبير مقارنة مع الخلايا السابقة لها و هي خلايا BSF بأستخدام طبقة عاكسة من الألمنيوم فوق عازل التخميل الخلفي تم تحقيق التلامس بين السيليكون و الألمنيوم من خلال مجموعة من الثقوب الصغيرة في العازل الكهربائي الذي يغطي حوالي 1٪ من السطح الخلفي مع تباعد حوالي 1 ملم .كما يوضح الفرق بينها وبين خلية BSF في الشكلين الاتيين .(3)



AI-BSF



PERC

هذا الهيكل البسيط للخلية الشمسية كان قادراً على إنتاج كفاءة عالية تصل 22 - 23 % . في تصنيع خلايا ال PERC الأولية , تم ترسيب طبقة من أكسيد تخميل حراري **thermal passivating oxide** على السطح الخلفي للخلية وفتح مجموعة من الثقوب الصغيرة بإستخدام الطباعة الحجرية الضوئية **Photolithography** .

ومن ثم تم تبخير الألمنيوم **Aluminum** على سطح الخلفي للخلية ومن ثم تليها عملية تلبيد **Sintering** في غاز تشكيل عند 250 – 400 درجة مئوية, وتم عمل حفر دقيق على سطح الخلية الأمامي بشكل أهرامات مقلوبة **inverted pyramids** لتقليل خسائر الاشعاع الشمسي بسبب الأنعكاس **reflection** ولتحسين عملية محاصرة الضوء المنعكس عن أوجه الشكل الهرمي , أي أعادة الشعاع المنعكس لداخل الخلية لزيادة أنتاج الخلية من الطاقة .يشتمل السطح الأمامي للخلية على باعث إنتقائي من الفسفور **selective phosphorus emitter** (تحت الموصلات المعدنية) **Metal contacts** , وطلاء مضاد للأنعكاس **Antireflection coating** , و أكسيد تخميل حراري **thermal oxide passivation** , أكسيد التخميل للسطح الأمامي والخلفي للخلية تم تحسينه بواسطة التلدين بالألمنيوم **Aluminum Annealing** أو التلدين بغاز تشكيل رطب **wet forming gas annealing** عند درجة حرارة 400 درجة مئوية . و أفضل جهد لوحظ 705 ملي فولت .

خلية ال PERC عالية الأداء الأولية **initial high-performance PERC** لم تكن تحتوي على طبقة أيونية موجبة p^+ **layer** عند نقاط التوصيل للسطح الخلفي للخلية **rear contact points** . حيث كان تصميم بسيط أستفاد من حقيقة إن الألمنيوم الغير مخلوط **non-alloyed aluminum** يمكن أن يحقق مقاومة منخفضة لنقاط التوصيل المباشرة بالنسبة لشريحة السيليكون نوع p منخفضة المقاومة **low-resistance P-type wafer** (0.1 - 0.5 أوم . سم) بدون حدوث أنتشار للسطح **without surface diffusion** .

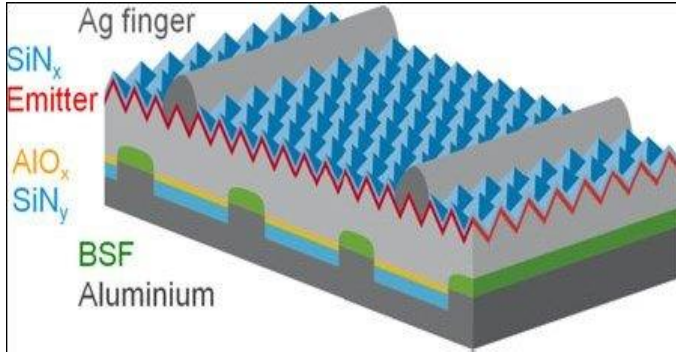
يعمل جزء التلامس الخلفي rear contact fraction بشكل جيد ضمن النطاق 0,1 – 10 % مع السليكون منخفض المقاومة نوع P . كانت بساطة وسرعة عملية تصنيع خلايا ال PERC مهمة , فقد سمحت بإحراز تقدم سريع , سرعان ما أصبح من الواضح أن خلايا ال PERC يمكن أن تنتج جهدًا عاليًا للدائرة المفتوحة وكانت أفضل من البدائل .

في بعض الخلايا ، تم خلط الألومنيوم و السليكون (سبيكة) وأستخدمت عند نقاط التلامس الخلفية عند درجات حرارة أعلى من 600 درجة مئوية , ومع ذلك كانت النتائج بدون صناعة السبائك أفضل ، ولم يستمر هذا النهج , وشملت المشاكل التي تمت مواجهتها الفراغات voids والأضرار التي لحقت بالأكسيد الخلفي أدى العمل اللاحق من قبل العديد من الباحثين إلى طريقة مجدية تجاريًا لتنفيذ هذا النهج ، كما هو موضح لاحقاً .

كان من الواضح أن تضمين انتشار البورون في السطح الخلفي للخلية لديه القدرة على زيادة تحسين أداء الخلية ، وإن كان ذلك على حساب التعقيد الإضافي .

أعلنت أول خلية PERC تجارياً في 2011 م , بمواصفات , نقاط تلامس موقعية Al-BSF لسطح الخلية الخلفي (Local Al-BSF rear contact) , ترسيب طبقة تخميل (PECVD passivation layer) , وبكفاءة أعلى من 19 % لخلايا شمسية بقطر 156 ملم . (3)

يتم توضيح خلية PERC التجارية النموذجية في الشكل أدناه (52) . حيث توضح الركيزة المكونة من السليكون المشوبة بالبورون (النوع p) السليكون أحادي أو متعدد البلورات . يحتوي السطح الأمامي للخلية على نسيج هرمي مقلوب ، وانتشار الفوسفور phosphorus diffusion ، و أصابع فضية مطبوعة على السطح الامامي (screen printed silver fingers) ، وطبقة نيتريد السيليكون (SiN) silicon nitride layer . طبقة نتريد السليكون SiN هي في نفس الوقت طلاء مضاد للانعكاس antireflection coating وطلاء تخميل passivation coating للمنطقة بين الأصابع الفضية . يشبه تصميم السطح الأمامي هذا لكل من الخلايا الشمسية بتقنية Al-BSF و الخلايا الشمسية بتقنية PERC ، مما يتجنب الحاجة إلى تطوير أدوات ومواد وعمليات جديدة .



خلية PERC تجارية نموذجية(52)

يتكون السطح الخلفي لخلية Al-BSF من الألمنيوم المخلوط بجودة تخميل ضعيفة نسبيًا وانعكاسية ضعيفة للأشعة . في المقابل ، يتميز تصميم PERC بطبقة من الألمنيوم المطبوعة على سطح الخلية والتي تقوم بتلامس الموصلات بشكل جزئي مع سطح السيليكون , بين هذه المناطق توجد طبقة عازلة ، عادةً أكسيد الألومنيوم aluminum oxide و نتريد السيليكون silicon nitride ، التي تخمل passivates معظم السطح الخلفي للخلية وتمنع أيضًا الألمنيوم من لمس السيليكون باستثناء مناطق التلامس (كما في الشكل السابق) .(52) ,وبالتالي ، يوفر تصميم PERC إعادة تركيب أقل للسطح الخلفي و انعكاسية محسّنة للسطح الخلفي .

عند إستخدام طبقة تخميل العازل من أكسيد السليكون SiO2 dielectric passivation على السطح الخلفي للخلية . قد تكون هذه مشكلة بالنسبة للإنتاج التجاري لعدة أسباب : يمكن أن تتسبب الشحنات الموجبة الموجودة بشكل عام في أكسيد السليكون SiO2 في ظهور منطقة استنفاد (depletion region) , أو طبقة انقلاب من النوع n على السطح الخلفي للخلية ، مما يؤدي إلى زيادة إعادة التركيب على السطح الخلفي . لا يمكن لأكسيد السيليكون SiO2 في حد ذاته أن يتحمل بسهولة خطوة التسخين الحراري لطلاء سطح الخلية بعجينةالألمنيوم (firing step) . ويمكن أن تتسبب الأكسدة الحرارية ذات درجات الحرارة العالية في تدهور مدى الحياة في بعض الركائز .

تم تطوير العديد من الطرق للتغلب على هذه المشاكل ، بما في ذلك استخدام AlOx / SiNy . يحتوي AlOx على شحنات سالبة ، مما يؤدي إلى تراكم الثقوب (الشحنات الموجبة) وأستنفاد الإلكترونات depletion electrons على السطح الخلفي للخلية ، مما يساعد على تخميل السطح الخلفي . (SiNy) عبارة عن عازل قوي يمكنه تحمل خطوة التسخين الحراري Firing step لطلاء سطح الخلية بعجينة الألمنيوم والتي تحدث عند درجات حرارة عالية . بينما يستخدم SiNy على نطاق واسع على السطح الأمامي لخلايا السيليكون الشمسية ، لأن الترسيب التجاري لـ AlOx يتطلب تطويرأدوات جديدة لذلك يعتبر مكلف من ناحية تطوير خط الأنتاج للخلايا الشمسية .

تم فتح فتحات التلامس في عازل السطح الخلفي في مختبرات تطوير خلايا الـ PERC عن طريق الليثوغرافيا الضوئية photolithography ، وهو أمر مكلف إن تطوير الاستئصال بالليزر عالي السرعة high-speed ablation للعزل الكهربائي الخلفي من أجل فتح فتحات التلامس سمح بتكوين سطح خلفي منخفض التكلفة . كان مطلوب عمل كبير لتطوير أدوات وعمليات مناسبة عالية السرعة.

عادة ما تقوم خطوة انتشار الفسفور phosphorus diffusion step في إنتاج خلايا الـ Al-BSF بتشويب doping الأسطح الأمامية والخلفية معاً . عملية تشكيل سبائك الألمنيوم Aluminum alloying في السطح الخلفي للخلية تلغي التشويب بالفسفور phosphorus doping للسطح الخلفي للخلية .

في خلايا الـ PERC ، يتم ترسيب فقط الألمنيوم المخلوط موقعياً , لذلك يجب استبعاد التشويب بالفوسفور phosphorus doping للسطح الخلفي للخلية .

تم تطوير العمليات التجارية بترسيب عازل واقي على السطح الخلفي للخلية قبل انتشار الفوسفور أو بإزالة طبقة الفسفور الخلفية بعد الانتشار باستخدام عملية حفر رطب من جانب واحد single-sided wet etching process . كان المعدن الخلفي لخلية الـ PERC من الألمنيوم المبخر evaporated aluminum ، وهو ليس اقتصاديًا , تم استبداله بألمنيوم مطبوع على السطح ،على غرار خلية الـ Al-BSF ، بالاستخدام المستمر لتقنية الإنتاج الضخم منخفضة التكلفة .

يشكل السيليكون Si و الألومنيوم Al سبيكة سهلة الانصهار Eutectic Alloy في فتحات التلامس أثناء خطوة التسخين بدرجات حرارة عالية أثناء طلاء سطح الخلية Firing Step ، ويمكن أن تتشكل منطقة رقيقة من الألمنيوم المشوب عند السطح بين السبيكة المنصهرة و السيليكون المكون للخلية الشمسية . هذا يقلل من مقاومة التوصيل و إعادة التركيب عند نقاط الاتصال .

كان مطلوبًا قدرًا كبيرًا من العمل لتشكيل سبائك الألومنيوم لمناطق التوصيل بشكل موثوق ، بما في ذلك تطوير المعاجين المعدنية المتخصصة .

التقنيات التي سمحت بتصنيع تجاري منخفض التكلفة لـ PERC تم تطويرها خلال سنوات من قبل العديد من الأشخاص والشركات. وكذلك سمح التقارب بين عملية تصنيع الخلايا بتقنية PERC الحالية وعملية تصنيع الخلايا بتقنية Al-BSF الأقدم بانتقال تجاري سلس وسريع إلى خلايا PERC .

5 – 4 – 1 الية صناعة الخلايا الشمسية من نوع PERC

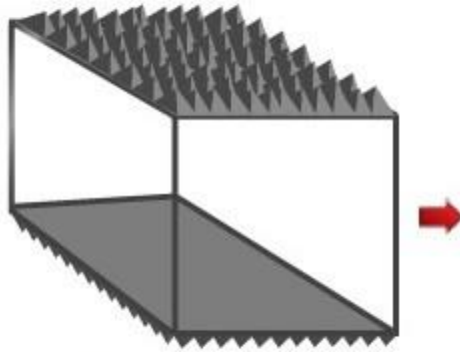
هيكل خلية الـ PERC هو تطور طبيعي من بنية خلية حقل السطح الخلفي القياسي (BSF) Back Surface Field السابقة لها . هذا النوع من الخلايا القائم على BSF يعاني من بعض القيود ، والتي أصبحت أكثر وضوحًا مع تركيز الصناعة على زيادة كفاءة الخلايا .

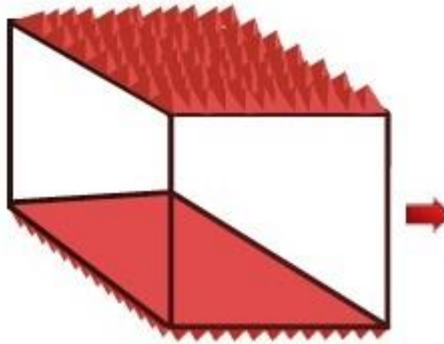
طبقة الألمنيوم المعدنية Metallic Aluminum Film - يتم وضعها على الجانب الخلفي من الخلية لتكون بمثابة خلية BSF - لا يمكنها دعم الجهود المبذولة لتقليل سرعات إعادة التركيب الخلفي Rear recombination ، فقط 60 إلى 70 ٪ من ضوء الأشعة تحت الحمراء (IR) الذي يصل إلى الألمنيوم الخلفي ينعكس للخلف , يمكن تقليل هذه الخسائر الكهربائية والاشعاعية بشكل كبير عن طريق ترسيب طبقة تخميل passivation عازلة إضافية على الجانب الخلفي وهذا هو الــ PERC , يتعامل هذا المفهوم فقط مع تحسين السطح الخلفي ، خاصة بهدف تقليل خسائر إعادة التركيب على الجانب المعتم للخلية ، وهو مستقل تمامًا عن الجانب الأمامي . يجب إضافة خطوتين إلى ثلاث خطوات إضافية فقط إلى خط أنتاج الخلايا القياسية السابقة . (2)

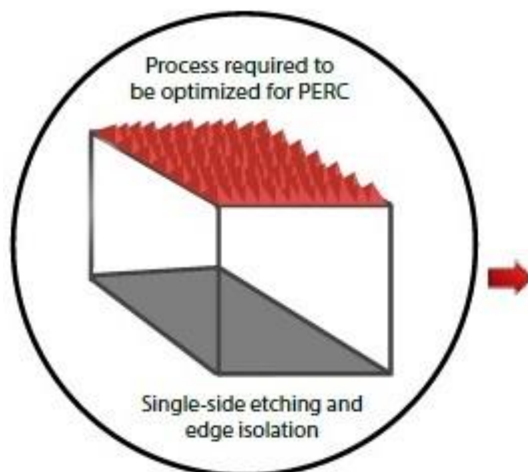
ترسيب طبقة تخميل على السطح الخلفي للخلية Rear Passivation Layer ، ويتم عمل فتحات فيها لاحقًا بالليزر لإفساح المجال لتشكيل نقاط اتصال خلفية بين السليكون وطبقة الألمنيوم المعدنية , هاتان خطوتان إضافيتان مهمتان لمعالجة الخلايا الشمسية القياسية .

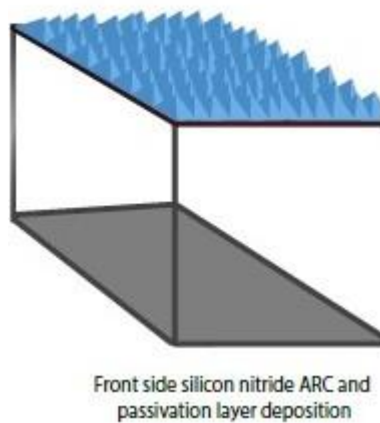
وبالتالي ، فإن نظام ترسيب طبقة التخميل ونظام فتح الطبقة بالليزر بشكل أساسي هما مجموعتا الأدوات الإضافية التي يتم إضافتها عادةً الى خطوط معالجة الخلايا القياسية BSF . (2)

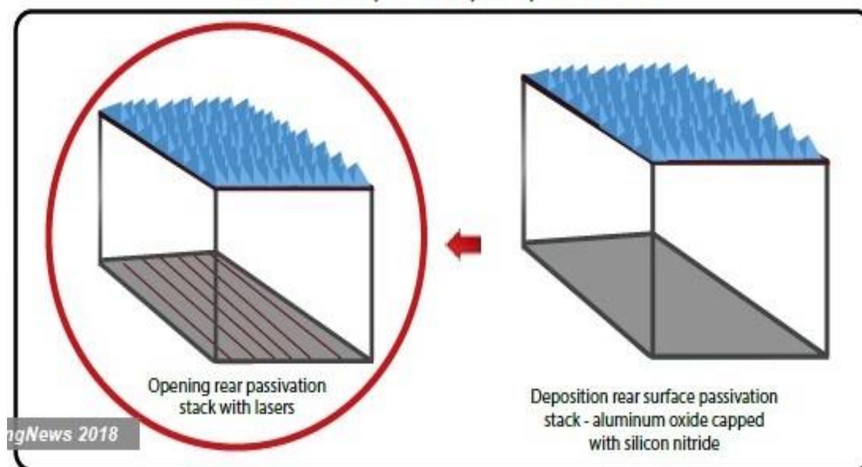
الشكل أدناه يوضح ملخص لخطوات تصنيع خلايا الــ PERC . (2)

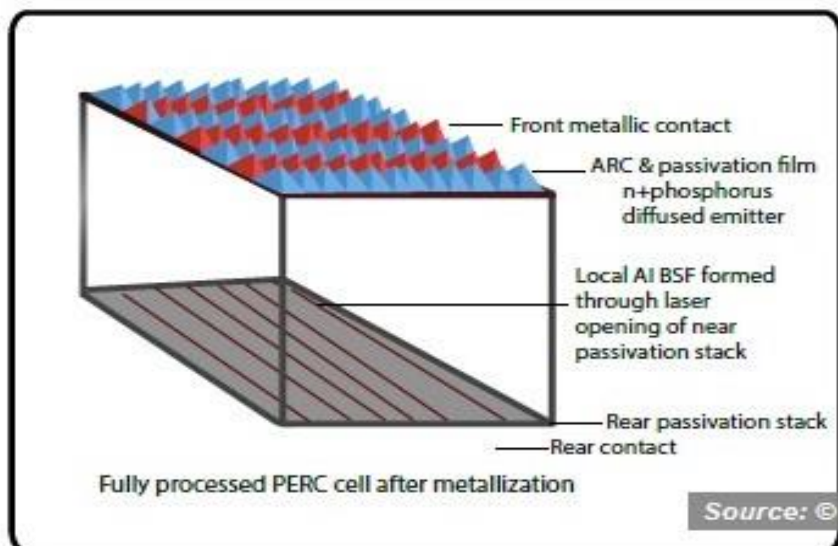

Texturing on both sides


Phosphorus diffusion
(tube furnace)


Process required to
be optimized for PERC
Single-side etching and
edge isolation


Front side silicon nitride ARC and
passivation layer deposition


Two additional process stapes required for PERC
Opening rear passivation stack with lasers
Deposition rear surface passivation stack - aluminum oxide capped with silicon nitride
ngNews 2018


Front metallic contact
ARC & passivation film n+phosphorus diffused emitter
Local Al BSF formed through laser opening of near passivation stack
Rear passivation stack
Rear contact
Fully processed PERC cell after metallization
Source: ©

مواد التخميل Passivation materials

مفتاح تصنيع خلايا الــ PERC هو التخميل الخلفي Rear Passivation ، في حين أن المادة المختارة بالإجماع لهذا الغرض هي بلا شك أكسيد الألومنيوم (Aluminum Oxide) وهي اشهرها أضافة لمواد اخرى ايضا تستخدم لتخميل سطح الخلية الشمسية مثل أوكسي نيتريد السيليكون Silicon Oxynitride . في المراحل الاولى من تصنيع خلاي ا لـ PERC ، تم إستخدام أكسي نتريد السيليكون . استمرالعمل على هذه التكنولوجيا لأكثر من عقد وتم تسويقها تجاريًا في عام 2012 . سبب آخر لاتخاذ هذا المسار هو تجنب استخدام مواد تخميل باهظة الثمن . لكن أكسيد الألومنيوم سرعان ما سيطر ، خاصة في الصين .

أكسيد الألمنيوم Aluminum Oxide

ما يجعل أكسيد الألومنيوم حقًا مميزًا للغاية هو كثافته العالية جدًا من الشحنات السالبة الثابتة التي تصل إلى 1013 / cm^3 توجد الشحنات الثابتة مباشرة على الواجهة بين أكسيد الألومنيوم و أكسيد السيليكون البيني الذي ينمو على رقاقة السيليكون أثناء عملية الترسيب ، مما يضمن تخميل فعال . يسجل أكسيد الألومنيوم أيضًا درجات عالية في التخميل الكيميائي . يعمل كخزان هيدروجين فعال يزود الهيدروجين لتشبع الروابط المكونة على سطح الخلية أثناء خطوات المعالجة الحرارية . أما بالنسبة للخصائص الأشعاعية ، فهذه الطبقات تكون ذات فجوة نطاق 6.4 الكترون فولت , شفافة بالنسبة لجزء من ضوء الشمس المرتبط بتطبيقات الخلايا الشمسية.

الجانب السلبي الوحيد هو معامل الانكسار المنخفض إلى حد ما , البالغ 1.65 ، مما يجعل أكسيد الألومنيوم أقل ملائمة لكونه طبقة أحادية مضادة للانعكاس Single layer antireflection film على جانب الباعث Emitter للخلية الشمسية .

التغليف بطبقة نيتريد السيليكون Capping with Silicon nitride

إن أكسيد الألومنيوم لا يمكنه تلبية جميع متطلبات التخميل الخلفي وحده . إنها تحتاج إلى طبقة حماية واقية لحفظها من عجينة الــ BSF المصنوعة من الألومنيوم . خلاف ذلك ، أثناء خطوة التسخين العالي ، سوف يخترق الألمنيوم المعدني المطبوع على سطح الخلية طبقة اكسيد الالمنيوم ، مما يؤدي إلى إتلافه تماماً .

من المتطلبات المهمة لطبقة التخميل الخلفية هو الانعكاس الداخلي في الجزء الخلفي من الخلية الشمسية . يؤدي هذا إلى تحديد مقياس للحد الأدنى من متطلبات سماكة الطبقة ، والذي يتراوح من 100 إلى 120 نانومتر (مقارنة بحوالي 60 إلى 70 نانومتر على السطح الامامي للخلية) . إن ترسيب مثل هذه الطبقة السميكة من أكسيد الألومنيوم لن يكون له معنى اقتصادي بسبب التكلفة العالية .

إضافة إلى ذلك ، فإن ترسيب أكسيد الألمنيوم السميك يؤثر سلبًا على إنتاجية الأداة , تكون خصائص الجودة الأخرى للطبقة ، مثل القوة الميكانيكية و المقاومة السطحية أفضل عندما تكون الطبقة رقيقة نوعًا ما . وهذا يعني أن طبقة أكسيد الألمنيوم يجب أن تكون رقيقة ، وفي نفس الوقت يجب أن تكون سميكة بدرجة كافية لحماية الخصائص البصرية (الأشعاعية) . وبالتالي ، فإن وضع طبقة رقيقة من أكسيد الألمنيوم وتغطيتها باستخدام نيتريد السيليكون هو الحل الأكثر ملائمة والطريقة المستخدمة لترسيب هذه الطبقة الحامية هي طريقة PECVD .

تقنيات الترسيب Deposition technologies

فيما يتعلق حول كيفية ترسيب أكسيد الألومنيوم ، يكون الاختيار في المجال التجاري بين ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما المعروف بـا (PECVD) المستخدم لترسيب نيتريد السيليكون وترسيب الطبقة الذرية (ALD) Atomic Layer Deposition .

معظم عمليات التصنيع الكهروضوئية لها جذورها في معالجة أشباه الموصلات وتم تعديلها في الغالب لجعلها مناسبة للإنتاج الكهروضوئية ، وهذا ينطبق بشكل خاص على ترسيب أكسيد الألومنيوم بطريقة ترسيب الطبقة الذرية ALD .

ترسيب الطبقة الذرية ALD Atomic Layer Deposition

في الواقع ، كانت أنظمة ترسيب الطبقة الذرية ALD هي الأولى التي تسهل ترسيب أكسيد الألمنيوم للتراكيب الكهروضوئية PV . مفاعلات ALD المستخدمة في تطبيقات أشباه الموصلات هي مفاعلات بطيئة للغاية . في حين أن وقت المعالجة الفعلي يكون بمقياس ملي ثانية ، وإن العمليات الإضافية مثل التنقية في نهاية كل خطوة تستغرق بضع ثوانٍ . نتيجة لذلك ، عادةً ما يكون لأنظمة ALD التقليدية إنتاجية منخفضة حوالي 50 رقاقة في الساعة , وهو أمر غير مرغوب فيه بالنسبة للتصنيع الكهروضوئي .

للتغلب على هذا القيد ، طور صانعو المعدات منصات إنتاج مبتكرة . تم إجراء تحديد جرعات المادة الأولية والمؤكسد والتطهير في نفس غرفة المفاعل , ولكن تم تكييف المنتجات مع حجم انتاج أكبر .

يدعم ALD بطبيعته هذه التعديلات ، مثل زيادة حجم الانتاج أو معالجة الركائز (السطح المراد الترسيب عليه) بمساحة أكبر ، والتي لها تأثير محدود على وقت الدورة . تتميز الانظمة الحديثة بأتمتة ذكية مع مركبة موجهة تلقائيًا لسهولة التشغيل .

تعالج الأداة الجديدة أيضًا دفعة من 800 رقاقة في وقت واحد ، تحقق إنتاجية عالية تبلغ 6000 رقاقة في الساعة . يتم تنفيذ العملية عند 150 إلى 300 درجة مئوية وتظهرالطبقة الناتجة تجانسًا جيدًا مع انحراف أقل من 1٪ داخل الوجبة الواحدة و 2٪ للرقائق من نفس الوجبة و من وجبات مختلفة .

نظرًا لأن أكسيد الألمنيوم يترسب بعد نيتريد السيليكون على جانب الباعث emitter ، فإن هذا العازل الكهربائي dielectric ذي الشحنة السالبة الثابتة لن يتلامس مع سطح باعث السيليكون ؛ بدلا من ذلك هو موجود على نيتريد السيليكون . وبالتالي ، يتم تجنب تكوين طبقة الانعكاس .

ترسيب الطبقة الذرية المكاني Spatial ALD

كبديل لأنظمة ALD التقليدية التي تعتمد على الوقت وتعمل في نمط انتاج دفعات ، قام عدد قليل من صانعي المعدات بتطوير ALD المكاني .

وهذا يعني أنه بدلاً من ضخ المواد المتفاعلة في غرفة واحدة ، يتم تقسيم المفاعل إلى مناطق منفصلة و يتم فصل مناطق المفاعل هذه بستائر غازية داخلية . عند العمل بشكل صحيح ، يمكن أن تعمل واقيات الغاز كمحامل غاز ، مما يتيح حركة الرقاقة بطريقة غير احتكاكية . تعمل محامل الغاز أيضًا كحواجز انتشار بين مناطق التفاعل ، مما يمنع التفاعلات المتقاطعة والترسب الطفيلي على جدران المفاعل .

لا تسمح هذه الطريقة بوضع التشغيل المباشر فحسب ، بل يتم تنفيذها أيضًا عند الضغط الجوي ، مما يوفر الكثير من الوقت لضخ المفاعل وتنفيسه. ترسيب الطبقة الذرية المكاني هو تطوير حصري للصناعات الكهروضوئية .

ميزة أخرى متأصلة في ALD المكانية هي أن الترسيب يحدث فقط على جانب واحد. تنقل الرقاقات أحادية الاتجاه من أحد طرفي غرفة الترسيب إلى الطرف الآخر. مع هذا النهج ، تبدو غرفة التفاعل وكأنها نفق طويل. يتم حقن المواد الأولية في بيئة المعالجة عن طريق سلسلة من القنوات الضيقة من أعلى وأسفل الغرفة باتجاه الرقاقة. الفجوة الضيقة تضمن أيضًا نقلًا مستقرًا .

ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما PECVD

ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما (PECVD) هو تقنية ترسيب رئيسية تستخدم في تصنيع خلايا السيليكون الشمسية . تُستخدم مفاعلات PECVD لترسيب طبقات رقيقة من نيتريد السيليكون (SiNx) ، ومؤخراً ، أكسيد الألمنيوم (AlOx) في تصنيع الخلايا الشمسية PERC .

تقنيات PECVD لترسيب نيتريد السيليكون على الجانب الامامي من الخلية تستخدم أيضاً لترسيب أكسيد الألمنيوم . يعد إدخال مادة ثلاثي ميثيل الألومنيوم (TMA) و تكييف آلية التنظيف هما التغييران الأساسيان اللذان يجب أن تخضع لهما أنظمة PECVD لتتمكن من ترسيب أغشية أكسيد الألومنيوم على الجانب الخلفي للخلية .

تتمثل إحدى الميزات المهمة لأنظمة PECVD على أدوات ALD هي القدرة على ترسيب طبقة حماية من نيتريد السيليكون أعلى أكسيد الألومنيوم في نظام واحد دون كسر الفراغ , هذا يعني أن عملية التخميل الخلفي الكاملة يتم تنفيذها في مسار واحد .

مقارنة تقنيات الترسيب

في حين أن الإنتاجية هي شيء مهم للغاية ، فإن معدات الترسيب لها العديد من خصائص الأداء الأخرى منها سمك طبقة الترسيب الموصى بها واستهلاك المواد الأولية و وقت التشغيل , وهي عوامل رئيسية .

سمك الطبقة , عندما يتعلق الأمر بسمك الطبقة ، لا يوجد معيار , تتمثل الطريقة الشائعة في الحفاظ على أكسيد الألومنيوم رقيقًا نوعًا ما ، بينما يملأ نيتريد السيليكون الفجوة ليتناسب مع متطلبات الحد الأدنى من السمك من حوالي 100 إلى 120 ميكرومتر لطبقة التخميل لسطح الخلية الخلفي لحماية الانعكاس الداخلي الخلفي .

يتغير السمك المطلوبة لأكسيد الألومنيوم وفقًا لطريقة الترسيب وأيضًا من مصنّع لآخر. الطبقات الرقيقة نسبيًا المرسبة باستخدام ALD كافية لتوفير تخميل فائق مقارنةً بـ PECVD .في الواقع ، نجح مصنعوا أدوات الترسيب في تقليل سمك الطبقة .

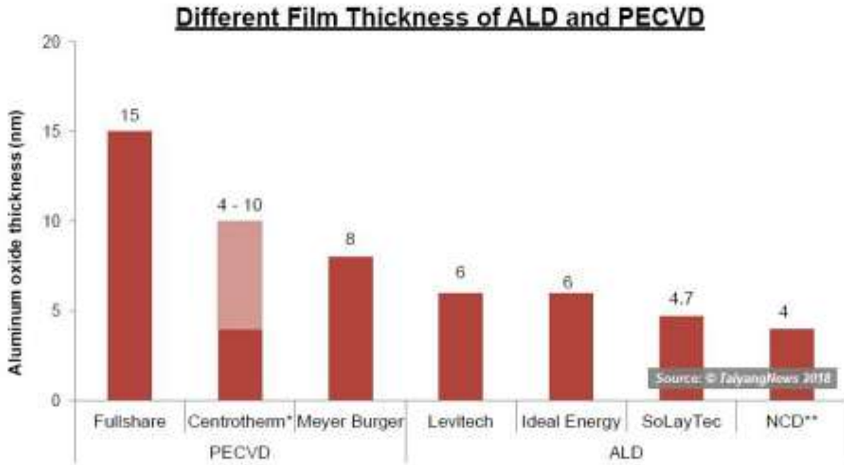
خلال الأيام الأولى لتطوير أكسيد الألومنيوم ، كان سمك الغشاء 30 نانومتر شائعًا . أصبح من الممكن الآن الحصول على سمك غشاء من رقم واحد مع كل نظام وتقنية تقريبًا .(2)

عادة تكون غرفة الترسيب بطول 6 أمتار و كل متر من الطول يمثل ترسيب 1 نانومتر من سمك الغشاء المترسب ، هذا يعني أن المواصفات هي 6 نانومتر .(2) , لكن في الحقيقة النظام يدعم أيضًا ترسيب أغشية أرق من 1 نانومتر .بينما كانت توصيات المصنعين بسمك غشاء من 6 إلى 10 نانومتر في تقاريرهم وفقًا لدراسات وتجارب فعلية تم إجراءها ، فإنها تنصح بسمك طبقة أكسيد الألومنيوم بسمك 4 نانومتر . عندما يكون PECVD هو اختيار تقنية الترسيب ، يلزم وجود أغشية أكثر سمكًا نسبيًا لتحقيق خصائص التخميل المطلوبة . (2)

بصرف النظر عن تقنيات الترسيب المستخدمة في ترسيب أكسيد الألومنيوم ، فإن سمك طبقة التغطية النموذجية الموصى بها تتراوح من 100 إلى 120 نانومتر , أحد أسباب الذهاب إلى طبقات الحماية الأكثر سمكًا هو معجون الفضة على الجانب الخلفي . عادةً ما تستخدم معاجين غير مقاومة للحرارة العالية للجانب الخلفي . ولكن إذا كان سمك نيتريد السيليكون رقيقًا جدًا ، فقد نواجه مشكلة في عملية التسخين العالية ، مما يقلل من جودة التخميل الخلفي عند موصلات الخلية (busbar) , لكي تكون في الجانب الآمن ، تستخدم الشركات طبقات أكثر سمكًا قليلاً. أو بعبارة أخرى ، تعمل الأغشية السميكة على تعزيز مقاومة التسخين العالي .

استهلاك ثلاثي ميثيل الألمنيوم Tri-Methyl Aluminum TMA

السمة المهمة التالية لأنظمة ترسيب اكسيد الالمنيوم AlOx هي استهلاك ثلاثي ميثيل الالمنيوم TMA ، وهو أحد عوامل التكلفة الرئيسية في هذه الخطوة لا يعتمد استهلاك المواد الأولية على سماكة الغشاء فحسب ، بل يعتمد أيضًا على تصميم المفاعل ومعدل استخدام ثلاثي ميثيل الالمنيوم (TMA) . أن أقل استهلاك من TMA يبلغ 1 مجم لكل رقاقة.يتمثل أحد التحسينات في التخفيض الكبير في سماكة الغشاء الموصى به من نطاق 10 إلى 20 نانومتر إلى قيمة 8 نانومتر ، مما لا يقلل من استهلاك الـ TMA مباشرة فحسب بل يجعل استخدام (TMA) فعالاً للغاية . (2)



مخطط لمعدل سمك ترسيب غشاء اكسيد الالمنيوم لبعض المصانع حسب تقنية الترسيب ALD و PECVD .(2)

إستخدام معجون الألمنيوم Aluminum Paste Approach

بينما تعتمد جميع الطرق المذكورة أعلاه على أكسيد الألمنيوم المترسب بالبخار Vapor Deposition Aluminum Oxide AlOx الذي يتطلب أدوات ترسيب مخصصة ، فقد طورت شركة New E Materials ، وهي شركة تابعة لشركة Eternal Materials Co. Ltd في تايوان ، معجون أكسيد الألمنيوم القابل للطباعة على سطح الخلية Screen Printable Aluminum Oxide Paste . (2) عند تطبيقه ، يعمل هذا المعجون كمادة تخميل خلفية Rear Passivation Material ، على غرار بخار أكسيد الألومنيوم المترسب .

قدمت New E Materials تفاصيل عن نهجها البديل في ورقة فنية تم تقديمها في المؤتمر التاسع والعشرين للاتحاد الأوروبي PVSEC (مواد التخميل الجديدة القابلة للطباعة من AlOx وتكامل العملية مع خط الإنتاج التجاري لكفاءة عالية (20٪) لخلايا PERC الشمسية) .

هذا النهج له مزايا معينة : يتم تطبيق المعجون عبر طابعات سطح الخلية screen printer ، وهي أقل تعقيدًا في التشغيل والصيانة ، وتتطلب كلفة مالية أقل مقارنة بأدوات الترسيب . ومن المزايا الأكثر أهمية أن هذا النهج يلغي استخدام ثلاثي ميثيل الألمنيوم (TMA) ، وهو ليس مكلفًا فحسب ولكنه خطير أيضًا .

بعض الشركات المصنعة للخلايا الشمسية تواصل عملها في التطوير باستخدام نهج PERC الذي يعتمد على طباعة الشاشة من أكسيد الألومنيوم ، والذي حققت فيه كفاءة بنسبة 21٪ بناءً على هيكل محسن مع تحسينات في السطح الأمامي والخلفي .

في ورقة فنية نُشرت في الدورة الثالثة والثلاثين للاتحاد الأوروبي PVSEC ، تم تقديم نتائج العديد من التحسينات ، مثل الباعث الانتقائي selective emitter وطبقة التغطية المزدوجة من أكسيد السيليكون / نيتريد السيليكون , و الطلاء المضاد للانعكاس المحسن improved anti-reflection coating , التي حققت نحو كفاءة 21.4 ٪ من خلال تنفيذ تقنيات مجدية صناعيًا في تقنية طباعة أكسيد الالمنيوم AlOx لخلايا الـ PERC . ما يسمى بتقنية DL CAP Dual Layer Capping ، وهي اختصار للتغطية المزدوجة . تعتمد على معجون أكسيد السيليكون المطبق مع طباعة سطح الخلية screen printing .

من خلال هذا النهج الجديد ، تم تحقيق زيادة كبيرة في متوسط الكفاءة بنسبة 0.45٪ مقارنة بخلايا الـ PERC القياسية . من هذا ، وفقًا للنتائج المقدمة ، ساهم الباعث الانتقائي selective emitter ، DL CAP و ARC المحسن في زيادة الكفاءة بنسبة 0.16 و 0.13 و 0.16 ٪ على التوالي. (2)

وبناءاً على هذه النتائج فقد وصلت متوسط كفاءة الخلايا بحدود 21.44٪ ، بينما كانت أفضل كفاءة 21.52٪ عند تطبيق هذه الأساليب الإضافية . (2)

أن تقنية التغطية المزدوجة DL CAP القائمة على معجون الطباعة printing paste يمكن دمجها بسهولة مع خطوط الإنتاج الحالية باستخدام نظام نيتريد السيليكون النموذجي بأقل تكلفة مالية إضافية .كما إن الحل متوافق أيضًا مع بنية خلايا الـ PERC لأكسيد الألمنيوم القائمة على ترسيب البخار.

عمل فتحات التوصيل بالليزر Laser Contact Opening

تدور تقنية خلايا الـ PERC بشكل أساسي حول تطبيق التخميل الخلفي Rear Passivation , ولكن لاستخراج حاملات الشحنة من الجانب الخلفي ، يجب أن تصل الملامسات المعدنية metallic contacts إلى السيليكون أسفل طبقة التخميل دون إتلافها , من أجل تمهيد المسار للألمنيوم المعدني للاتصال بالسيليكون ، يتم فتح طبقة تخميل السطح الخلفي بالليزر ، وهي خطوة تسمى عمومًا فتح التلامس بالليزر (LCO) Laser Contact Opening .تقدم العديد من شركات الليزر الرائدة أنظمة ذات تقنيات مختلفة , على سبيل المثال ، أداة مبتكرة تعتمد على الحركة المستمرة , على عكس الأدوات التي تعتمد على تصميم الطاولة الدوارة ، والتي لها تأخر زمني في الحركة الميكانيكية ، تسمح تقنية الحركة المستمرة بالتدفق المستمر للرقائق .

يتم وضع الرقاقة المراد معالجتها على وسادة هوائية تمر عبر مجموعة مستشعرات لاكتشاف الهندسة الحقيقية وموضع الرقاقة , التصميم يلغي أي فترة انتظار, أثناء معالجة إحدى الرقائق ، تعمل أنظمة المحاذاة بالتوازي مع الرقائق الأخرى . بسعة إنتاجية محددة تبلغ 3800 الى 8000 رقاقة في الساعة . (2)

بينما تقنية الطاولة الدوارة أدواتها تعتمد على مصادر ليزر نانوثانية , ومصممة للحفاظ على تكاليف الصيانة منخفضة , يعتمد النظام على منصة منضدة دوارة وتبلغ الإنتاجية المقدرة 6000 رقاقة في الساعة . تدعم الأداة أيضًا الزخرفة المعقدة ، مثل الزخرفة المنقطة والمتقطعة . (2)

تلميع سطح الخلية الخلفي Rear Polishing

إن ترسيب طبقة التخميل الخلفي و إزالة الترسب الغير مرغوب للمعادن هما شرطان أساسيان مهمان لخلايا الـ PERC ، كذلك فإن تلميع السطح الخلفي له نفس الأهمية . السبب وراء إزالة السطح المشكل على هيئة قمم (غير مستوي اي بشكل هرمي) هو أن السطح العشوائي الشبيه بالهرم يُظهر درجة أعلى من إعادة الأتحاد مقارنة بالسطح المصقول . وأحد الأسباب الواضحة هو أن السطح الهرمي يزيد من مساحة السطح و كذلك الروابط المتدلية dangling bonds . خاصة عند استخدام تقنية ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما PECVD للترسيب ، تكون تغطية طبقة التخميل أفضل على سطح مستوي . و نظرًا لأن الجانب الخلفي للخلية لا يشارك بنشاط في امتصاص الضوء ولا يشارك في محاصرة الضوء المباشر ، فلا ضرر في إزالة السطح المشكل الغير مستوي texturing .

وهناك سبب أكثر جوهرية , بعد عملية الانتشار diffusion ، يتم تشويب doping رقاقة السليكون ، يجب أن يتم إخفاء السطح الخلفي بشكل واضح أو يتم تحقيق الانتشار أحادي الجانب . لأنه إذا كان الفوسفور موجودًا في الجانب الخلفي ، فيجب إزالته وهذا مايحدث عند اجراء تلميع السطح الخلفي للخلية .

التعدين Metallization

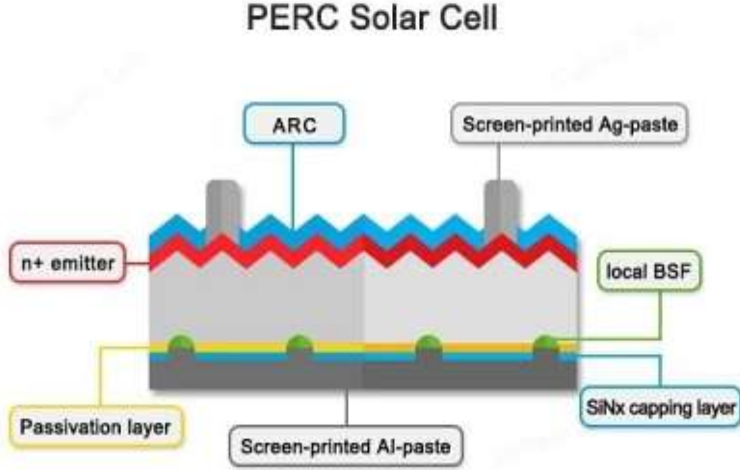
مثل أي تقنية خلايا شمسية متقدمة ،تتطلب خلايا PERC نظام معجون معدني metallic paste خاص .المنتج الأكثر أهمية للمعادن هو عجينة السطح الخلفي BSF Back Surface Field . لا يتفاعل معجون الألمنيوم المناسب في تلك المناطق التي يغطي فيها طبقة التخميل ، ولكنه في نفس الوقت ينشئ نقاط توصيل في المناطق المفتوحة باستخدام الليزر لإنشاء نقاط توصيل خلفية موقعية Local BSF . سمات هذه المعاجين ذات شقين : لا ينبغي أن تتغلغل خلال طبقة التخميل , و يجب أن تظهر التصاق Adhesion وقابلية لحام solderability جيدة .

من الناحية الفنية ، لا يلزم سوى تحقيق طبقة معدنية خلفية و معاجين BSF خاصة لخلايا الـ PERC ، بينما يمكن تطبيق معجون التوصيل الأمامي القياسي على جانب الباعث (سطح الخلية الأمامي) . مع الأخذ في الاعتبار حقيقة أن خلايا الـ PERC تحتاج إلى المعالجة في درجات حرارة منخفضة نسبيًا .

يمكن تحقيق مناطق التوصيل الموقعية Local BSF بعدة طرق , الأسلوب المعياري هو أن يكون فتح مناطق التوصيل بالليزر لنمط الخط line pattern ,هناك إمكانية لتحسين الكفاءة عند تطبيق نمط نقطي dot أو متقطع dashed pattern لفتح طبقة التخميل الخلفي rear passivation layer . هذا يقلل من المقاومة الكبيرة للتلامس الخلفي . كذلك تستخدم معاجين الألمنيوم المطلية بالسيليكون والتي تسهل تشكيل السبائك أثناء تحقيق التلامس الخلفي ، وبالتالي تحسين فعالية تشكيل التلامس .

هناك تحسن مهم آخر في تقنية خلايا الـ PERC , حيث يعمل مصنعو الخلايا على وجود أكسيد الألمنيوم AlOx على جانبي الرقاقة , تتطلب إضافة أكسيد الألمنيوم AlOx على جانب الباعث(سطح الخلية الأمامي) Emitter تحسين العجينة ، حيث يجب أن يخترق المعجون من خلال طبقة الغشاء العازل Dielectric film . (2)

5 – 4 – 2   ملخص صناعة الخلايا الشمسية بتقنية PERC : (1)



خلية شمسية بتقنية PERC . (1)

*** نستخدم شريحة من السليكون نوع P (P-Type Si) .**

*** نقوم بمعالجة كيميائية بهيدروكسيد البوتاسيوم KOH مع بعض التعديلات على الاحماض و بوجود عامل الحرارة وهذه العملية تقوم بتغيير سطح الخلية الاملس الى تكوين نتوء او مناطق اشبه بالهرم بحيث نغير سطح الخلية الاملس الى سطح ذو نتوء هرمي الشكل وتسمى هذه العملية بـ (Texture) وتجري هذه المعالجة الكيميائية على سطح الخلية الامامي والخلفي لشريحة السليكون .**

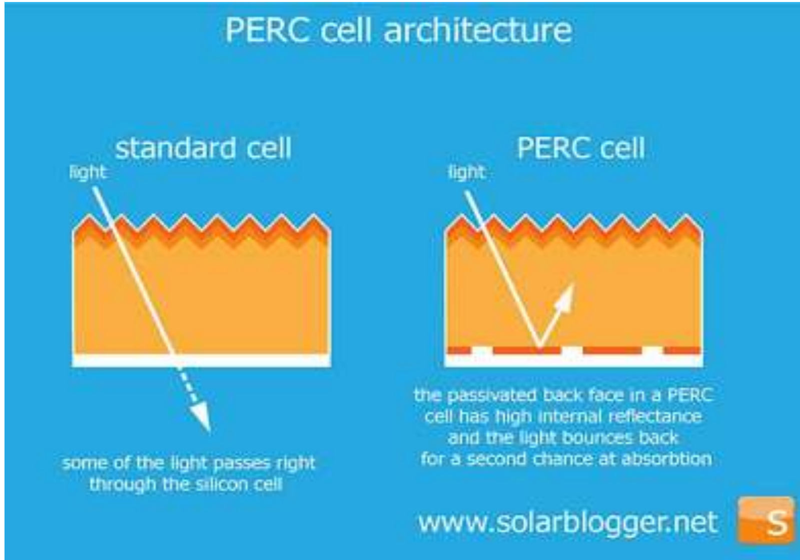
*** ثم يتم اجراء عملية انتشار سطحي للفسفور لسطح الخلية الامامي . وتظهر عملية الانتشار على سطح واحد ولكن في الحقيقة عملية الانتشارالسطحي تتم لخليتين متقاربتين Back to Back بحيث نقلل قدر الامكان هذه العملية بحيث يكون لدينا طبقة خفيفة من n^{+} على السطح الخلفي بعد ذلك يتم ازالتها كيميائيا عبر اجهزة خاصة**

*** عملية معالجة كيميائية لسطح الخلية الخلفي لإزالة الشكل الهرمي لسطح الخلية وإزالة رواسب الفسفور التي ترسبت على السطح خلال عملية إنتشار الفسفور .**

*** نقوم بطلاء سطح الخلية الخلفي بترسيب مادة اوكسيد الالمنيوم AlOx كطبقة تخميل للسطح الخلفي للخلية . وترسيب طبقة من أكسيد حراري على سطح الخلية الأمامي**

*** طلاء سطح الخلية الامامي والخلفي بترسيب مادة نترات السليكون .**

يعني السطح الخلفي لخلية الـ PERC ليست فقط نترات السليكون لكن تحت هذه الطبقة نرسب طبقة من مادة اوكسيد الالمنيوم تكون ذات شحنة سالبة وطبقة نترات السليكون ذات شحنة موجبة والا لن تعمل الخلية بشكل جيد اذا لم توجد هذه الطبقات . كذلك تقوم طبقة نترات السيليكون بحماية طبقة أكسيد الألمنيوم . وبهذه الحالة يتم القضاء على عملية اعادة الالتحام لحاملات الشحنة السالبة والموجبة اي نقلل تيار الفقد لغاية 5 % اي انه تم التخلص من معظم تيار الفقد في هذه المنطقة .هذه العملية تسمى التخميل(Passivation) .



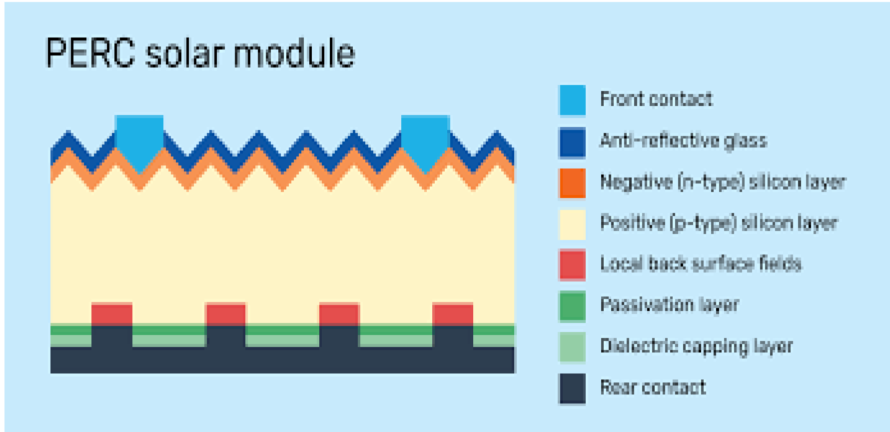
توضيح خاصية إنعكاس الضوء من سطح التخميل الخلفي لداخل الخلية مرة اخرى لزيادة التيار

المتولد من خلية PERC . (1)

* بعد ذلك الالمنيوم اساسا لن يستطيع الوصول الى السليكون بينما الفضة تستطيع الوصول الى السليكون عبر نترات السليكون لان دقيق الزجاج المخلوط مع معجون الفضة بأمكانه ثقب طبقة نترات السليكون من مناطق محددة وبالتالي وصول الفضة الى منطقة السليكون لعمل توصيل كهربائي بينما الالمنيوم لايستطيع ذلك .

لذلك نستخدم الليزر لعمل فتحات في طبقة نترات السليكون وطبقة التخميل وبعد عمل هذه الفتحات نقوم بتوصيل الالمنيوم اما طباعته بشكل كلي او طباعته بشكل خطوط كما في الواح **Bifacial** وبعد ذلك نسخن الخلية الى اعلى من 750 درجة مئوية لتكوين مناطق تسمى p^+ **Local** .

اذن الفرق بين الخلايا التي يكون تماس السطح الخلفي للخلية مع الالمنيوم بشكل كامل **Full Back Surface Al** و الخلايا التي تحتوي على فتحات توصيل للالمنيوم p^+ **Local** (تكون هذه الفتحات ضيقة تصل الى 60 مايكرومتر) ان تيار الفقد العالي يكون في جزء محدود في منطقة الفتحات بالاضافة لتيار الفقد المنخفض في المنطقة بين الفتحات وهذه العملية قامت برفع 20 الى 30 % من جهد الخلية وبذلك اصبحت خلايا الـ **PERC** تقدم لنا كفاءة اعلى تصل الى اكثر من 23 % . ولكن مازالت هناك مشاكل في فواقد منطقة الباعث **Emitter** وفي الالمنيوم ويجب تقليل تلك الفواقد الى اقل ما يمكن .



تركيب خلية **PERC** . (1)

مخطط يوضح تسلسل عملية تصنيع خلايا PERC . (1)



اذن خلية ال PERC كتقنية عالجت عدة مسائل من اهمها تقليل تيار الفقد والذي رفع من جهد الدائرة المفتوحة للخلية وبالتالي رفع كفاءة الخلية بالاضافة لعكس الأشعاع النافذ خلال الخلية من السطح الخلفي للخلية واعادته الى داخل الخلية مما يزيد من معدل الاشعاع الشمسي المستفاد منه لتوليد التيار الكهربائي . كل هذه العوامل جعلت تقنية خلايا ال PERC تقدم خلايا شمسية بكفاءة اعلى .

5 – 5 الخلايا الشمسية بتقنية TOPCon

حظي هيكل التلامس الخامل لأكسيد النفق (TOPCon) Tunnel Oxide Passivation Contact بمزيد من الاهتمام لتطوير الخلايا الشمسية عالية الأداء من خلال إدخال طبقة أكسيد نفق tunnel oxide layer بين الركيزة substrate والسليكون متعدد البلورات poly-Si ,وهو الأفضل لتحقيق تخميل السطح interface passivation . تعتمد جودة تخميل طبقة أكسيد النفق tunnel oxide passivation layer بشكل واضح على رابطة أكسيد السيليكون SiO في طبقة أكسيد النفق ، والتي تتأثر بالتلدين اللاحق subsequent annealing حيث تتشكل طبقة أكسيد النفق في منطقة الأكسيد الثانوية (SiO ، Si2O ، Si2O3) في سطح التلامس interface مع الركيزة substrate .

في منطقة الأكسيد الثانوية ، تتشكل رابطة غنية بالأكسجين O2 نتيجة التلدين اللاحق الذي يحسن أيضًا جودة التخميل . للتحكم في شكل السطح surface morphology ، والتلدين annealing ، ومعدل التسارع acceleration rate ، يمكن تحقيق وصلة p-n بجهد تقريباً 700 مللي فولت أو أكثر (Voc) بوجود نفق أكسيد oxide tunnel مع خاصية التخميل على رقاقة من النوع p (P-type wafer) . تنخفض جودة التخميل للعينات المعرضة للتلدين (المعالجة الحرارية السريعة Rapid Thermal Processing) RTP عند درجات حرارة أعلى من 900 درجة مئوية بسرعة . لتحسين جودة تخميل طبقة أكسيد النفق ، يجب مراعاة الخصائص الفيزيائية والاستقرار الحراري للطبقة الرقيقة . (4)

المعالجة الحرارية السريعة RTP Rapid Thermal Processing

المعالجة الحرارية السريعة (RTP) هي عملية تصنيع أشباه الموصلات , تقوم بتسخين رقائق السيليكون إلى درجات حرارة تتجاوز 1000 درجة مئوية لمدة لا تزيد عن بضع ثوانٍ . أثناء التبريد ، يجب خفض درجات حرارة الرقاقة ببطء لمنع حدوث خلع وتكسر ناتج عن الصدمة الحرارية thermal shock .

غالبًا ما يتم الوصول إلى معدلات التسخين السريعة هذه بواسطة مصابيح عالية الكثافة أو الليزر . تُستخدم هذه العمليات في مجموعة متنوعة من التطبيقات في تصنيع أشباه الموصلات بما في ذلك التشويب النشط و الأكسدة الحرارية و إعادة تدفق المعادن و ترسيب البخار الكيميائي .

تحتوي الخلية الشمسية السيليكونية الـ TOPCon على باعث أمامي منتشر من البورون boron diffused front emitter ، و على السطح الخلفي نفق أكسيد ذات بنية SiOx / n^+ - poly-Si / SiNx: H ، وأقطاب مطبوعة على السطح screen-printed electrodes على كلا الجانبين . (53)

تبلغ تيارات التشبع Jo لهذا الهيكل على السطح المصقول 1.3 fA / cm2 ولأسطح السيليكون المشكلة (غير مستوية) textured 3.7 fA / cm2 قبل طباعة موصلات الفضة. بعد طباعة موصلات الفضة Ag ، يزداد تيار التشبع Jo لهذا الهيكل إلى 50.7 fA / cm2 على أسطح السيليكون المشكلةTextured silicon surfaces ، (4) .

في تصميم خلايا الـ TOPCon ، لا يتلامس المعدن بشكل مباشر مع الرقاقة السليكونية . بدلاً من ذلك ، يتم ترسيب طبقة أكسيد نفق رقيقة Thin tunneling oxide ، متبوعًا بطبقة مشوبة doped بدرجة عالية باستخدام سيليكون متعدد البلورات نوع N أو P (poly silicon n/p) . حيث يحجب أكسيد النفق نوعًا واحدًا من ناقلات الشحنة . لذلك ، يشار إلى هذه البنية عادة باسم الموصلات الخاملة . نحن بحاجة إلى نظام ترسيب بولي سيليكون (سليكون متعدد البلورات) poly silicon عالي الخضوع high –yield . لكن، هناك حوالي ثلاث تقنيات مختلفة يتم أخذها في الاعتبار بالنسبة لترسيب هذه الطبقات خلال التصنيع على نطاق واسع : (4)

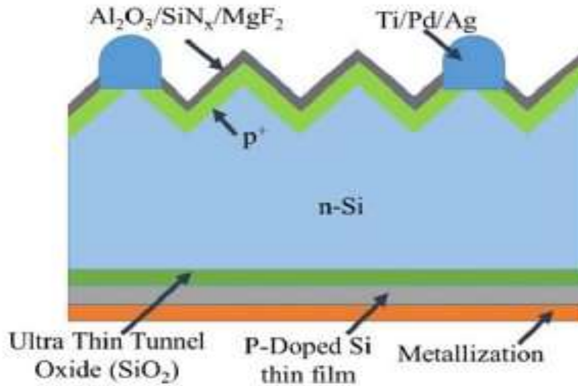
- **ترسيب البخار الكيميائي بالضغط المنخفض (LPCVD) .**
- **ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما (PECVD) .**
- **ترسيب البخار الكيميائي بالضغط الجوي (APCVD) .**

التي تم شرحها مسبقاً , بالإضافة الى عملية الرش sputtering . المطلب الاخر المهم هو تعدين طبقة البولي سيليكون الرقيقة metallization of thin poly silicon film . تعتبر طباعة السطح بدرجات الحرارة العالية high temperature screen-printing هي الشكل الصناعي للإجراء . يتمثل التحدي في الحفاظ على طبقة أكسيد النفق الرقيقة / طبقة البولي سيليكون من التدمير بسبب تسخين المعجون المعدني paste عند درجة الحرارة المرتفعة . يزيل الاحتراق للعجينة المعدنية الطبقة الرقيقة من البولي سيليكون , ويدخل جسيمات الفضة النانوية Ag في السيليكون البلوري poly silicon الذي يعزز تيار التشبع j0 في منطقة التلامس الخاملة .

أغشية البولي سيليكون التي يزيد سمكها عن 150 نانومتر يمكنها تحمل الاحتراق في الحرارة الشديدة ، من ناحية أخرى ، تتمتع طبقات البولي سيليكون هذه بمعامل امتصاص كبير coefficient of absorption . (58)

5 – 5 – 1 تصنيع الخلايا الشمسية بتقنية الـ TOPCon

يوضح الشكل أدناه تجميع بناء الخلية . (4) , أهم ميزات تكوين هذه الخلية هو باعث البورون **boron emitter** على الجانب الأمامي للخلية , وطبقة ربط خاملة **Passivating Connecting layer** على الجانب الخلفي للخلية ، مع اصابع التوصيل **fingers** التي يتم لصقها بواسطة نظام طباعة السطح **screen-printing** وكذلك تتم الطباعة على الوجهين الأمامي و الخلفي لتطوير خلية شمسية ثنائية الوجه **bifacial** . الشكل أدناه يوضح تركيب خلية **TOPcon** . (4)



على السطح الأمامي، يتم استخدام طبقة **SiNx** كطلاء مضاد للانعكاس، في حين يتم استخدام طبقة رقيقة من أكسيد الألومنيوم (**Al2O3**) للطبقة التخميلية، مما يقلل من سرعة إعادة التركيب السطحي إلى أقل من **50** سم / ثانية.

في الخلف، يتم استخدام طبقة نفقية رقيقة جدًا (≤ 2 نانومتر) من **SiO2** كطبقة نقل إلكترون، في حين يتم استخدام طبقة رقيقة من طبقة **poly-Si** المشوبة بكثافة **n** لتوفير اتصال أومي في الخلف والمجال الكهربائي لتتمكن الإلكترونات المولدة ضوئيًا من المرور عبر طبقة **SiO2** .

هناك نوعان مختلفان من تكوينات TOPCon بالنسبة للسطح الخلفي للخلايا الشمسية المعتمدة على c-Si. هي :

1. جهة الاتصال الخلفية نوع n n-type .

2. الاتصال الخلفي نوع p p-type .

هيكل الخلية الكهروضوئية لـ n-TOPCon ، والذي يستخدم كجهة اتصال خلفية للخلايا الشمسية المستندة إلى n-type c-Si.

يحتوي على أكسيد النفق، الذي تم تطويره وتنميته في حمض النيتريك، مع طبقة من السيليكون المشوب نوع P . بعد ذلك، ترسيب طبقة سيليكون غير متبلور a-Si ، ويتم إجراء عملية التلدين عند درجة حرارة عالية جدًا، والتي تتراوح بين 800 درجة مئوية و900 درجة مئوية. بعد التلدين، يتم تعريض هذا الهيكل لتخميل الهيدروجين لمدة حوالي 30 دقيقة عند درجة حرارة 400 درجة مئوية.

و يتكون هيكل خلية p-TOPCon المستخدم كجهة اتصال خلفية للخلايا الشمسية المستندة إلى p-type c-Si من طبقة أكسيد السيليكون الرطبة كيميائيًا (SiOx)، وهي طبقة رقيقة للغاية. علاوة على ذلك، فهو مغطى أيضًا بطبقة سميكة من كربيد السيليكون المشوب بالفوسفور (SiC). يبلغ سمك هذه الطبقة 15 نانومتر، ويتم ترسيبها باستخدام عملية ترسيب البخار الكيميائي المعزز بالبلازما (PECVD) ، والتي تم تقويتها وتصلبها بشكل أكبر من خلال عملية التلدين في فرن أنبوبي عند درجة حرارة عالية تصل إلى ما فوق 800 درجة مئوية .

تسلسل عمليات صناعة خلية الـ TOPCon موضح في الشكل التالي : (4)



Process diagram of production of TOPCon Solar Cell[17)]

بإستخدام محلول هيدروكسيد البوتاسيوم Potassium Hydroxide (KOH) يتم تكوين شكل هرمي غير منتظم لسطحي الخلية الامامي و الخلفي .

بعد تنظيف RCA ، باستخدام محلول ثلاثي بروميد البورون (BBr3) ، يتم إنشاء باعث البورون boron emitter في فرن نشر البورون .

من خلال عملية الإزالة لسطح واحد single side etching بإستخدام محلول مكون من حامض الهيدروفلوريك Hydrofluoric acid HF و حامض النتريك Nitric acid HNO3 , تتم إزالة البورون المنتشر على السطح الخلفي للخلية Removing of rear boron diffusion . نحصل على خلية نوع N مع باعث امامي نوع P .

بعد التنظيف بالمواد الكيميائية ، يتم ترسيب أكسيد النفق tunneling SiOx حراريًا , ومن ثم يتم ترسيب طبقة بولي سيليكون نقية intrinsic poly-silicon في نظام ترسيب الـ LPCVD على سطح الخلية الخلفي , و يتم تشويبها (doped) لتكون n-type في فرن نشر كلوريد الفوسفوريل (POCl3) .

بعدها ، يتم إجراء عملية الإزالة Etching process على جانب واحد single side للجانب الأمامي للخلية لإزالة الشوائب مثل ترسبات البولي سيليكون poly silicone . ثم يتم إجراء تنظيف RCA الإضافي .

يتم تخميل باعث البورون boron emitter وترسيب طبقة من طبقة عازلة dielectric layer ، والتي تعمل في المقابل كطلاء مضادة للانعكاس anti-reflection layer .

ثم يتم ترسيب طبقة من نتريد السليكون SiNx باستخدام ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما PECVD .

بالنسبة للتعدين , يتم طباعة موصلات معدنية بتصميم H بواسطة طباعة السطح screen-printing على كلا الجانبين (bus-bars) . تليها إجراء الحرق السريع (Rapid Firing Procedhre) بأعلى درجة حرارة بحدود 760 درجة مئوية . (4 , 85)

تم فحص الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري بدقة في السنوات القليلة الماضية . وجد تركيز عالٍ من الإلكترونات في منطقة تلامس الشريحة الموجبة والسالبة في الخلية الشمسية P-N junction ، وبالتالي فإن النتيجة هي فقدان كبير لإعادة تركيب الإلكترونات Recombination في الخلية الشمسية ، عندما يكون المعدن على اتصال مباشر مع رقاقة السيليكون .

5 – 5 – 2 تركيب الخلايا الشمسية بتقنية TOPCon

يتم تخميل الخلية بواسطة طبقة رقيقة من أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) على سطح المادة من النوع P ، وتحتوي على طبقة رقيقة جدًا حوالي 2 نانومتر من ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) كطبقة نفق , و غشاء بولي سيليكون مشوب بشدة على سطح المادة من النوع N .

تتمثل الخصائص الرئيسية للخلية الشمسية TOPCon في التخميل على السطح بواسطة غشاء أكسيد النفق ، والاتصال الانتقائي لتحقيق الحد الأدنى بشكل لا يصدق من إعادة التركيب recombination من التشويب المكثف لطبقة بولي سيليكون . يجب أن تكون طبقة SiO_2 النفقية tunneling SiO_2 layer رقيقة بما يكفي لنقل الالكترونات ، (85) , ولكن في نفس الوقت ، يمكن أن يؤدي تأثير المجال الخاص بها إلى منع ناقلات الأقلية minority carriers من الانتقال .

خصائص التخميل لطبقة بولي سيليكون المشوبة بشكل مكثف تتنوع من خلال ملائمة معدل تركيز الهيدروجين عن طريق ترسيب البخار الفيزيائي (PVD) .

على سبيل المثال , ترسيب الطبقة الذرية (ALD) أو الرش ، أو ترسب البخار الكيميائي (CVD) ، مثل ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما (PECVD) ، أو ترسيب بخار كيميائي منخفض الضغط (LPCVD) .

تكشف طبقة البولي السليكون المشوبة بشكل مكثف عن نوعية جيدة من التخميل ، بسبب الكمية الهائلة من ذرات الهيدروجين في طبقة بولي سيليكون .

5 – 5 – 3 إجراءات الخلية الشمسية TOPCon

1 - ترسيب طبقة أكسيد رقيقة جداً Ultra-thin Oxide Layer

الطرق العملية لترسيب طبقات رقيقة للغاية من الأكسيد للخلية الشمسية TOPCon حوالي 1.4 إلى 1.5 نانومتر تشمل : الأكسدة الحرارية thermal oxidation و الغمس الكيميائي الرطب wet chemical dipping و تنظيف الأوزون فوق البنفسجي (UV / O3) Ultra violet ozone cleaning .

بالإضافة إلى ذلك ، فإن أبسط طريقة لإنتاج الطبقة الرقيقة من الأكسيد هي الغمس الكيميائي الرطب في محلول الخليط الحمضي solution of acidic mixture عند درجة حرارة تزيد عن 90 درجة مئوية . يمكن أيضًا فصل عملية الأكسدة الحرارية إلى أكسدة رطبة وجافة من الأكسجين ، وفقًا لاستخدام بيئة الأكسدة . (4)

الأكسجين النقي والجاف المستخدم للأكسدة الجافة من الأكسجين كجو مؤكسد ، ولتكوين غشاء الأكسيد ، عند درجات حرارة عالية يتفاعل الأكسجين مباشرة مع غاز الهيدرازين hydrazine gas . أما الأكسجين الرطب هو بخار شديد النقاء من الماء النقي كجو مؤكسد ، ويشكل طبقة أكسيد من جزيئات الماء والأكسيد على سطح التفاعل . بشكل عام ، يكون معدل أكسدة الأكسجين الجاف أقل من معدل أكسدة الأكسجين الرطب .

2 – إنشاء غشاء بولي سيليكون مشوب Poly Silicon Doped Film

يتم إنشاء التشويب doping الهائل لطبقة البولي سيليكون بواسطة : استخدام ترسيب البخار الكيميائي منخفض الضغط LPCVD لطبقة السيليكون ، الملائمة مع تشويب الأيونات الإضافية ، أو عن طريق استخدام ترسيب البخار الكيميائي المحسن بالبلازما PECVD لترسيب طبقة من غشاء السيليكون المشوب Silicon doping film .(4,85)

3 – تحليل عامل الخسارة Loss Factor Analysis

يتم تصنيف عوامل الخسارة في فئات : الخسارة البصرية Optical loss و إعادة التركيب Recombination و المقاومة Resistance . (4,60)

مثلاً , في أحد التجارب التي أجريت على خلية TOPcon قياسية المبينة تفاصيلها في المخططين و الجدول التالية (4) حيث تم تسجيل كفاءة قياسية Bulk Limit على أنه 33٪ (4)

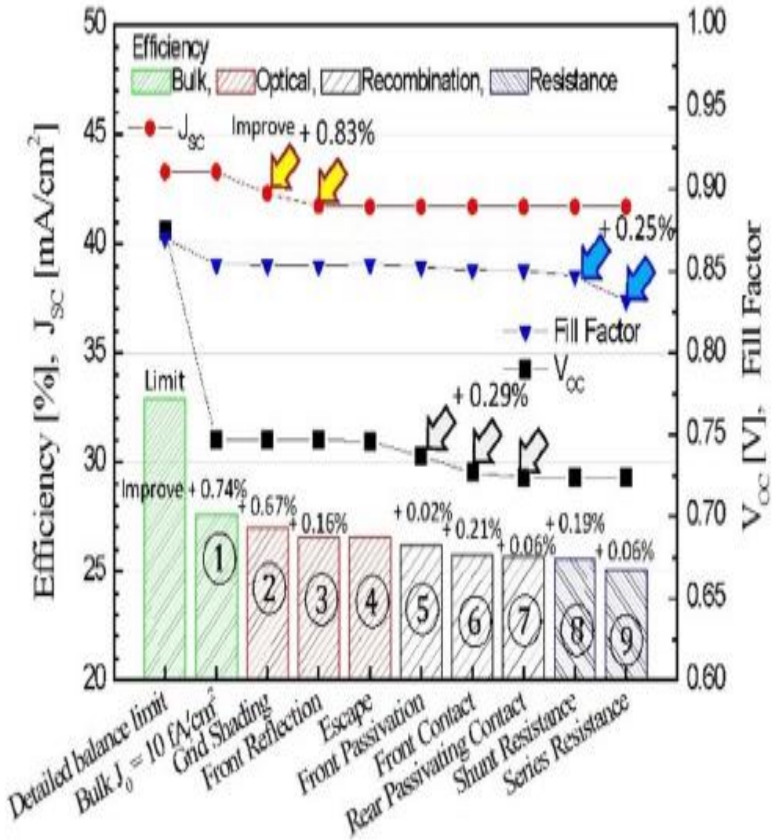
حيث تم تسجيل خسارة 5.35٪ بسبب تيار التشبع Jo عند 10 fA / cm2 و تنخفض الكفاءة إلى 27.6٪ كما هو موضح عند النقطة 1 .

العامل الثاني هو الخسارة البصرية التي تنتج عن التظليل 0.65٪ و الانعكاس الأمامي 0.38٪ وفقدان الهروب 0.02٪ مما يقلل الكفاءة عند 26.95٪ و 26.57٪ و 26.55٪ على التوالي , كما هو موضح عند النقاط 2 و 3 و 4 .

العامل الثالث هو خسارة إعادة التركيب التي يسببها التخميل الأمامي 0.37٪ ، والتلامس الأمامي 0.40٪ وملامسة التخميل الخلفي 0.11٪ والتي تخفض أيضًا الكفاءة إلى 26.18٪ و 25.78٪ و 25.67٪ كما هو موضح عند النقاط 5 و 6 و 7 .

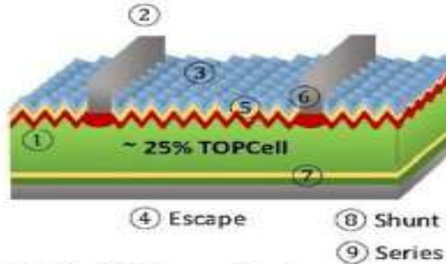
يرجع عامل الخسارة الأخير إلى المقاومة الكهربائية وهي مقاومة التحويل 0.10٪ والمقاومة التسلسلية 0.46٪ التي تسبب انخفاض الكفاءة إلى 25.56٪ و 25.10٪ كما هو موضح عند النقطتين 8 و 9 . (56,4)

يتم وصف تحليل عامل فقدان الكفاءة في جدول تحليل عوامل خسائر الكفاءة Analysis of efficiency loss factor حسب كثافة التيار (مللي أمبير / سم 2) ، جهد الدائرة المفتوح Voc ، عامل التعبئة FF (٪) ، فقدان الكفاءة (٪) و الكفاءة النهائية .



تحليل عامل الخسارة للكتلة ، والبصرية ، وإعادة التركيب والمقاومة . (4)

J_{SC} (mA/cm²)	V_{OC}(V)	FF(%)	Eff.(%)
41.67	0.724	83.20	25.10



Detailed Balance Limit
(Radiative & Auger Recombination)
Silicon E_g = 1.125 eV (@298.15 °K)
Thickness = 170 μm

J_{SC} (mA/cm²)	V_{OC}(V)	FF(%)	Eff.(%)
43.25	0.875	87.01	32.92

التخطيط الهيكلي للخلايا الشمسية TOPCon لعوامل الخسارة . (4)

Table 1. Analysis of efficiency loss by material

		Cell Structure	Unit	Value	Remark	J_{SC} (mA/cm²)	V_{OC} (V)	FF (%)	Eff. (%)	Eff. Loss (%)
SRH Bulk	①	Bulk J_0	fA/cm²	10	ITRPV 2019 Report	43.25	0.747	85.42	27.60	5.32
Optical Loss	②	Shading	%	2.25	Finger Width = 20 μm, Thickness = 20 μm, # of Finger = 190 ea Dual printing, Busbar = 0.3 mm (12BB), Reflected Absorption Grid	42.28	0.747	85.34	26.95	**0.65**
	③	Front Reflectance	%	2.28	Textured + Boron emitter + Multi Layer ARC	41.70	0.747	85.30	26.57	**0.38**
	④	Escape	%	0.07	Absorption missing at longwave length	41.67	0.746	85.41	26.55	0.02
Recombination Loss	⑤	Front Passivation	fA/cm²	4.4	$J_{0,\,full\,surface}$ = 4.5 fA/cm² (@200 Ω/sq.) Textured + Boron emitter + Passivation with Single ARC	41.67	0.737	85.24	26.18	**0.37**
	⑥	Front Contact	fA/cm²	6.89	$J_{0,\,full\,contact}$ = 300 fA/cm², (@40 Ω/sq.) Contact Fraction = 2.30% (dual printing)	41.67	0.727	85.09	25.78	**0.40**
	⑦	Rear Passivating Contact	fA/cm²	2.5	$J_{0,\,full\,contact}$ = 2.5 fA/cm² Polished + Oxide + Poly-Si (Optimized Process with SiNx Coating)	41.67	0.724	85.06	25.66	**0.11**
Electrical Loss	⑧	Shunt Resistance	Ωcm²	4000	Selective emitter (200 Ω/sq. / 40 Ω/sq.)	41.67	0.724	84.73	25.56	**0.10**
	⑨	Series Resistance	mΩcm²	290.9	Wafer resistivity = 5 Ωcm, Contact Resistivity = 1.5 mΩcm²	41.67	0.724	83.20	25.10	**0.46**

جدول تحليل عوامل خسائر الكفاءة . (4)

4 - تحليل TCAD لثنائية الوجه و كفاءة التحويل لخلايا TOPCon الشمسية نوع n

يتم فحص ثنائية الوجه Bifaciality و كفاءة التحويل Conversion Efficiency لخلايا TOPCon نوع n من خلال تحسين عرض إصبع (الموصلات) Finger Width لسطح الخلية الخلفي Rear Side . (4) , يتم إجراء تحليل TCAD عن طريق تغيير عرض إصبع الجانب الخلفي Rear side finger من 25 ميكرومتر إلى 1200 ميكرومتر.

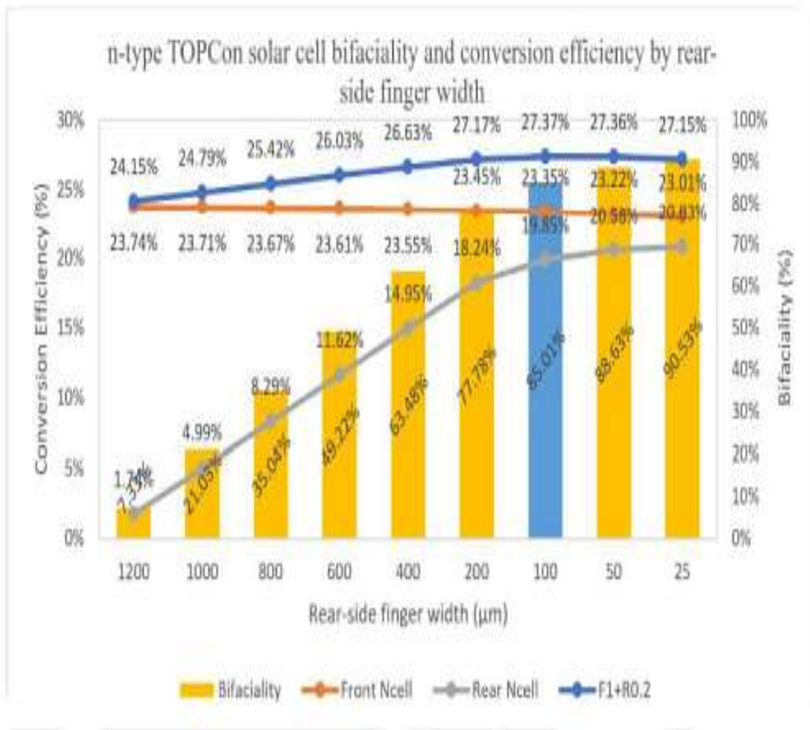
ويتم ملاحظة الكفاءة على الجانب الأمامي والخلفي وأيضًا يتم حساب ثنائية الوجه عن طريق قسمة كفاءة الجانب الخلفي على كفاءة الجانب الأمامي (rear side Eff. / front side Eff.) . (55)

تم تسجيل الكفاءة عند 25 ميكرومتر من عرض الإصبع الخلفي بنسبة 23.01٪ من الجانب الأمامي , و 20.83٪ من الجانب الخلفي ، وتأتي ثنائية الوجه عند هذا العرض (25 ميكرومتر) بنسبة 90.53٪ (20.83 % / 23.01 %) . (54,4)

كلما زاد عرض أصبع توصيل الجانب الخلفي ، تنخفض كفاءة الجانب الخلفي للخلية بشكل ملحوظ لكن كفاءة الجانب الأمامي للخلية تزداد قليلاً . (54,4)

نظرًا لانخفاض كفاءة الجانب الخلفي عن طريق زيادة عرض إصبع الجانب الخلفي وزيادة كفاءة الجانب الأمامي عند زيادة عرض الجانب الخلفي ، لذلك يمكننا تحديد القيمة المثلى لعرض إصبع الجانب الخلفي باستخدام F1 + R0.2 , وتعني أن تلخص قيمة الكفاءة بنسبة 100٪ من الجانب الأمامي وقيمة الكفاءة بنسبة 20٪ للجانب الخلفي .

القيمة المثلى لعرض إصبع الجانب الخلفي هي 100 ميكرومتر حيث تكون كفاءة الجانب الخلفي 19.85٪ وكفاءة الجانب الأمامي 23.35٪ والفعالية المثلى على كلا الجانبين هي 27.37٪ تحصل عليها من F1 + R0.2 كما هو موضح في الشكل أدناه . (4)



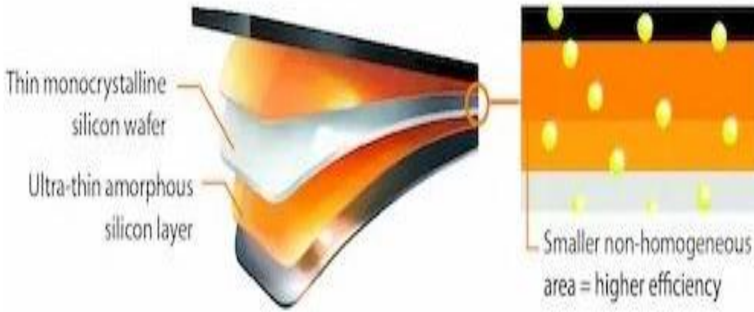
تحليل TCAD لثنائية الوجه و كفاءة التحويل للخلايا الشمسية TOPCon من النوع N .(4)

5 – 6 الخلايا الشمسية الغير متجانسة Heterojunction Solar Cell (HIT)

تجمع الخلايا الشمسية غير المتجانسة بين تقنيتين مختلفتين في خلية واحدة : خلية سيليكون متبلورة محصورة بين طبقتين من السيليكون "الرقيق" غير المتبلور.

تسمح هذه التقنيات ، عند استخدامها معًا ، بحصد المزيد من الطاقة مقارنة باستخدام أيٍّ من التقنيتين بمفردهما . النوع الأكثر شيوعًا من الألواح الشمسية مصنوع من السيليكون البلوري - إما أحادي البلورية أو متعدد البلورات. النوع الأقل شيوعًا من الخلايا الكهروضوئية هو الأغشية الرقيقة ، وهي مصنوعة من مجموعة متنوعة من المواد ، أحدها السيليكون غير المتبلور. على عكس السيليكون البلوري ، لا يحتوي السيليكون غير المتبلور على بنية بلورية منتظمة. بدلاً من ذلك ، يتم ترتيب ذرات السيليكون بشكل عشوائي. بالنسبة للتصنيع ، يعني هذا أنه يمكن ترسيب السيليكون غير المتبلور على السطح - وهي عملية أبسط وأقل تكلفة من تشكيل بلورات السيليكون المتبلور . (10) , في حد ذاته ، يكون السيليكون غير المتبلور أقل كفاءة في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء. ومع ذلك ، فإنها تتمتع بميزة التصنيع الأقل تكلفة. هذه التكلفة المنخفضة والمرونة في نوع المواد التي يمكن أن يترسب عليها السيليكون غير المتبلور هما ميزتان مهمتان .

مع الخلايا الشمسية غير المتجانسة ، تحتوي رقاقة السيليكون البلورية التقليدية على سيليكون غير متبلور مترسب على سطحه الأمامي والخلفي. ينتج عن هذا طبقتان من الأغشية الشمسية الرقيقة التي تمتص فوتونات إضافية لن يتم التقاطها بواسطة رقاقة السيليكون البلورية الوسطى . كما في الشكلين التاليين . (10,62)



Heterojunction Cell



Conventional crystalline Solar cell

كيف تزيد الخلايا الشمسية غير المتجانسة من الكفاءة

تتكون الخلية الشمسية من مادة رقيقة تلتقط جزءًا بسيطًا من ضوء الشمس الذي يصطدم بها . سوف يمر بعض ضوء الشمس عبر الخلية ، وسوف يرتد البعض الآخر عن السطح . تستفيد تقنية الطاقة الشمسية غير المتجانسة من ذلك من خلال بناء خلية شمسية من ثلاث طبقات مختلفة من المواد الكهروضوئية. تقوم الطبقة الوسطى من السيليكون أحادي البلورية بمعظم أعمال تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء . هناك طبقة عليا من السليكون الرقيق غير المتبلور تلتقط بعض ضوء الشمس قبل أن تصطدم بالطبقة البلورية ، كما أنها تلتقط بعض ضوء الشمس الذي ينعكس على الطبقات أدناه . ويكون رقيق للغاية ، حيث يمر الكثير من ضوء الشمس من خلاله. ومع ذلك ، فإنها تولد ما يكفي من الكهرباء الإضافية لجعل التكلفة الإضافية جديرة بالاهتمام . على الجانب الخلفي من السيليكون البلوري توجد طبقة رقيقة أخرى. يلتقط ضوء الشمس الذي يمر عبر أول طبقتين. وإذا كانت اللوحة عبارة عن تصميم شفاف اي زجاج ولوحة خلفية شفافة ، فإن هذه الطبقة الخلفية الرقيقة ستضيف قدرًا كبيرًا من الكهرباء بسبب ضوء الشمس الذي ينعكس عن الأرض . من خلال بناء خلية من تركيبة من ثلاث طبقات ضوئية مختلفة ، يمكن أن تصل اللوحة الشمسية غير المتجانسة إلى كفاءات تصل إلى 21٪ أو أعلى . هذا مشابه للوحات التي تستخدم تقنيات مختلفة لتحقيق أداء عالٍ .

مزايا الخلايا الشمسية غير المتجانسة

المزايا الرئيسية للخلايا الشمسية غير المتجانسة على خلايا السيليكون البلورية التقليدية هي:

ـ كفاءة أعلى

ـ تكلفة أقل مقارنة بالتقنيات الأخرى المستخدمة لتحسين الأداء ، مثل PERC

ـ معامل درجة حرارة أقل (أداء محسّن في درجات الحرارة المرتفعة)

بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن تكون التقنيات الأخرى التي يستخدمها المصنعون للوصول إلى كفاءات عالية جدًا أكثر تكلفة. يعتبر السيليكون غير المتبلور تقنية رخيصة نسبيًا. في حين أن هذا النوع من الطاقة الشمسية ذات الأغشية الرقيقة ليس بنفس كفاءة السيليكون البلوري تقريبًا ، إلا أنه يستفيد من التصنيع البسيط نسبيًا. من خلال طلب خطوات تصنيع أقل من التقنيات الأخرى ، فإن الألواح غير المتجانسة لديها القدرة على أن تكون فعالة من حيث التكلفة من الأنواع الأخرى .

تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية الشمسية الغير متجانسة

قد تتمتع لوحات HJT بميزة عندما يتعلق الأمر بالأداء عند درجات الحرارة العالية . الألواح الشمسية أقل فعالية في درجات الحرارة المرتفعة. هذه ظاهرة معروفة ـ في الواقع ، يتم سرد الأداء عند درجة الحرارة في ورقة بيانات أي لوحة شمسية . ومع ذلك ، فإن إحدى مزايا الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة هي أنها تتمتع بمعامل درجة حرارة أفضل من السيليكون البلوري. هذا يعني أن درجات الحرارة المرتفعة لها تأثير أقل على الأغشية الرقيقة منها على السليكون أحادي البلورية أو متعدد البلورات التقليدي .

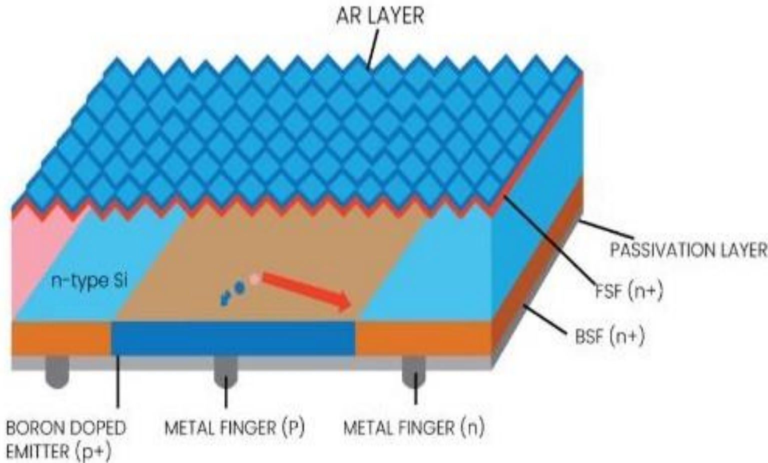
مع وجود طبقتين من السيليكون الرقيق الغير متبلور ، تكتسب الألواح غير المتجانسة ميزة على الألواح الشمسية التقليدية عندما يتعلق الأمر بالحفاظ على الأداء العالي مع ارتفاع درجة الحرارة .

5 – 7 خلايا الأتصال الخلفي المتداخل الشمسية (Interdegetated Back Contact (IBC

تعد الخلايا الشمسية IBC (الاتصال الخلفي المتداخل) واحدة من تكوينات الخلايا الشمسية ذات التلامس الخلفي. يمكن للخلايا الشمسية ذات التلامس الخلفي أن تحقق نظريًا كفاءة أعلى عن طريق تحريك جميع شبكات الاتصال الأمامية - أو جزء منها - إلى الجانب الخلفي من الخلية . يتم تحقيق الكفاءة العالية المحتملة بسبب التظليل المنخفض في مقدمة الخلية وهذا مفيد بشكل خاص في الخلايا المرتفعة التيار مثل المكثفات الشمسية أو التركيب في مساحات كبيرة. هناك العديد من أنواع الخلايا الشمسية الخلفية التوصيل , وخلايا IBC هي واحدة منها .

الخلايا الشمسية نوع IBC

تتمتع الخلايا الشمسية ذات التلامس الخلفي بالقدرة على منع جميع خسائر التظليل عن طريق وضع كلا الموصلات على الجزء الخلفي من الخلية. بحيث من الممكن جمع أزواج الثقوب و الإلكترونات الناتجة عن الضوء الذي يتم امتصاصه في السطح الأمامي للخلية في الجزء الخلفي من الخلية ، باستخدام خلية شمسية رفيعة مصنوعة من مادة عالية الجودة. هذه الخلايا مفيدة بشكل خاص في تطبيقات المكثف الشمسي . و تتمثل فائدة إضافية لهذه الخلايا في أنه يمكن ربط الخلايا التي تحتوي على كل من جهات الاتصال الموجودة في الخلف بشكل أسهل ويمكن وضعها بالقرب من بعضها البعض في اللوحة النمطية لأنه لا توجد حاجة لأي مسافة بين الخلايا . شكل يوضح تركيب خلية IBC . (5)



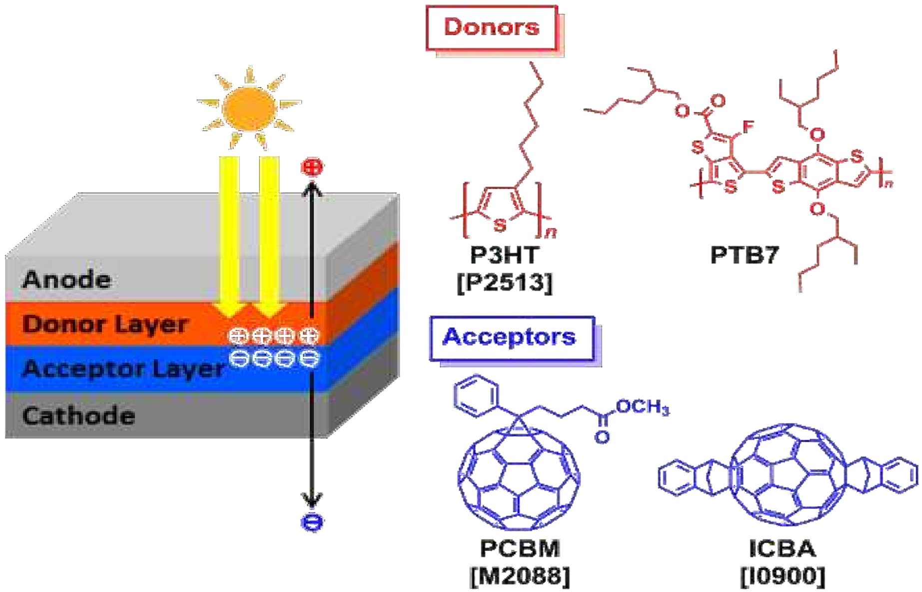
وكانت تسمى الخلايا الشمسية ذات الاتصال الخلفي المتبادل في الأصل FSF (حقل السطح الأمامي) (64). تمت دراسة خلية الاتصال الخلفي المتداخلة (IBC) بشكل أساسي في أواخر السبعينيات . تمكنت خلية PC (نقطة الاتصال) التي طورتها جامعة ستانفورد في الثمانينيات من الوصول إلى كفاءات تزيد عن 20٪ من البداية ، وقد تم إنشاء خلايا IBC لأول مرة للطائرات بدون طيار وسيارات السباق التي تعمل بالطاقة الشمسية في التسعينيات. ، وتم تمديدها لاحقًا إلى الإنتاج على نطاق واسع لأنظمة توليد الطاقة الكهروضوئية في العقد الأول من القرن الحادي والعشرين. لتقليل تكاليف التصنيع ، تم تطوير العديد من العمليات منخفضة التكلفة .

هناك نوعان مختلفان من التكوينات الأخرى للخلايا الشمسية ذات الاتصال الخلفي غير IBC ، وهما EWT (التفاف الباعث) و MWT (التفاف المعدن) تحت خلايا Si الشمسية متعددة الكريستالات . (5)

8 – 5 الخلايا الشمسية العضوية (OPV) Organic Photovoltaic

تهدف الخلايا الشمسية الكهروضوئية العضوية (OPV) إلى توفير حل كهروضوئي (PV) وفير ومنخفض إنتاج الطاقة. تتمتع هذه التكنولوجيا أيضًا بالإمكانيات النظرية لتوفير الكهرباء بتكلفة أقل من تقنيات الجيل الأول والثاني للطاقة الشمسية . نظرًا لأنه يمكن استخدام مواد امتصاص مختلفة لإنشاء خلايا OPV ملونة أو شفافة ، فإن هذه التقنية جذابة بشكل خاص لسوق الطاقة المدمجة في المباني . حققت الخلايا الكهروضوئية العضوية كفاءات تقترب من 11٪ ، لكن قيود الكفاءة بالإضافة إلى الموثوقية طويلة الأجل لا تزال حواجز كبيرة.

على عكس معظم الخلايا الشمسية غير العضوية ، تستخدم خلايا OPV ماصات جزيئية أو بوليمرية ، مما ينتج عنه إكسيتون موضعي . يتم استخدام مواد الامتصاص بالاقتران مع مستقبل الإلكترون ، مثل الفوليرين ، الذي يحتوي على حالات طاقة مدارية جزيئية تسهل نقل الإلكترون . عند امتصاص الفوتون ، ينتقل الإكسيتون الناتج إلى السطح البيني بين مادة الامتصاص والمادة المستقبلة للإلكترون . (65) , يوفر عدم التطابق النشط للمدارات الجزيئية قوة دافعة كافية لتقسيم الإكسيتون وإنشاء ناقلات شحن حرة (إلكترون وثقب) . (65)



ترتبط الكفاءات المنخفضة لخلايا OPV بأطوال انتشار الإكسيتون الصغيرة و نواقل حاملات الشحنة المنخفضة . تؤدي هاتان الخاصيتان في النهاية إلى استخدام طبقات رقيقة نشطة تؤثر على الأداء العام للخلية . علاوة على ذلك ، يظل العمر التشغيلي لخلايا OPV أقل بكثير من العمر الافتراضي للخلايا غير العضوية .

يركز البحث الحالي على زيادة كفاءة الخلية وعمرها . تم تحقيق مكاسب كبيرة في الكفاءة بالفعل من خلال تحسين مادة الامتصاص .

يتم تصنيف خلايا OPV إلى فئتين : (65)

خلايا OPV الجزيئية الصغيرة

خلايا OPV القائمة على البوليمر

تستخدم خلايا OPV ذات الجزيء الصغير جزيئات ذات امتصاص واسع في الجزء المرئي والقريب من الأشعة تحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي . عادةً ما تُستخدم الأنظمة شديدة الاقتران لنظام التبرع بالإلكترون مثل الفثالوسيانين والبولي آسين . غالبًا ما تستخدم أصباغ البيريلين والفوليرين كنظم قبول الإلكترون . يتم إنشاء هذه الخلايا بشكل شائع عن طريق الترسيب الفراغي لإنشاء معماريات ثنائية الطبقات ومترادفة . في الآونة الأخيرة ، تم تطوير أنظمة الجزيئات الصغيرة المعالجة بالمحلول .

تستخدم خلايا OPV القائمة على البوليمر أنظمة جزيئية طويلة السلسلة للمواد المتبرعة بالإلكترون (على سبيل المثال ، P3HT ، MDMO-PPV) ، جنبًا إلى جنب مع الفوليرينات المشتقة كنظام قبول الإلكترون (على سبيل المثال ، PC60BM ، PC70BM) . مثل خلايا OPV الجزيئية الصغيرة ، فإن هذه الأنظمة لها أطوال صغيرة لانتشار الإكسيتون .

5 – 9 خلية بروفسكايت الشمسية Perovskite Solar Cell (PSC)

تَعِد مواد البروفسكايت التي اكتشفت قبل نحو قرن بتطبيقات واعدة في مجالات عديدة. ويعود الفضل في اكتشافها إلى مجموعة من الباحثين الروس أسموها على اسم أستاذهم عالم المعادن الروسي ليف بروفسكي Perovski .

وتشكل هذه المواد طبقة كبيرة من طبقات القشرة الأرضية، وتتميز بالموصلية العالية للكهرباء. وبسبب تلك المواد فإن القشرة الأرضية تمتص الشحنات الكهربائية القوية من الرياح الشمسية التي تسقط على الأرض في منطقة القطبين وتتسبب في ظاهرة الشفق القطبي. ولولا طبقة البروفسكايت في القشرة الأرضية لدمرت تلك الشحنات الأرض ولما كانت هناك حياة عليها.

والبروفسكايت مادة بلورية تتكون عادة من ثلاثة أنواع من الذرات أو الجزيئات: ذرة معدن في المنتصف (تكون عادة من الرصاص أوالقصدير) ترتبط بذرات هالوجين صغيرة (عادة من الكلور أوالبروم أواليود) وكاتيون عضوي كبير الحجم يشغل الفراغ بين البلورات. تترتب البلورات على شكل هرمين ملتصقين من القاعدة.
فى عام 2009 استخدمت تلك المواد للمرة الأولى كخلية شمسية في اليابان بمختبرات الدكتور مياساكا، وبعدها بعامين أنتج البروفيسور هنري سنيث بجامعة أكسفورد أول خلية شمسية من مواد البروفسكايت من طبقات صلبة. ومنذ ذلك الحين نشهد أبحاثا كثيرة حول تطبيقات تلك المواد في مجال الخلايا الشمسية بصورة أساسية، والعديد من التطبيقات الأخرى.
وإدراك التطور الكبير الذي أحدثته تلك المواد في الخلية الشمسية يتبين من ارتفاع كفاءتها من 3.8% عام 2009 إلى 25.5% عام 2020، في حين استغرقت مادة السيليكون أكثر من 50 عاما من النشاط البحثي للوصول إلى الكفاءة نفسها.
ليست الكفاءة الكبيرة هي المزية الوحيدة للبروفسكايت كمادة فعالة في الخلايا الشمسية؛ فهناك العديد من المزايا الأخرى، مثل سهولة التصنيع حيث يمكن طباعتها بطرق هندسية تشبه – إلى حد ما – طباعة الورق والصحف لأن مادة البروفسكايت تُرسّب من محلول فتكون في حالة سائلة أثناء التصنيع والتحضير، ومن ثم لا يوجد كمٌّ مهدر من المواد مثل السيليكون الذي يفقد معظمه أثناء عملية التقطيع.

وهذه العوامل السابقة تسهم في خفض تكلفة إنتاج الخلايا الشمسية بشكل كبير مقارنة بخلايا السيليكون، ومع أمكانية تحقيق كفاءات أعلى , ومن ثم يمكن استخدام تلك الخلايا بصورة واسعة نظرا للتكلفة المتدنية التي لطالما كانت المعول عليه في انتشار تلك الخلايا وزيادة استخدامها في كل المجتمعات. (66 , 72)

البيروفسكايت , وهو في الغالب عبارة عن مادة هجينة عضوية و غير عضوية أساسها الرصاص أو هاليد القصدير كطبقة ناشطة لحصاد الضوء . (66,67)

مواد البيروفسكايت مثل هاليدات الرصاص ميثيل الأمونيوم و هاليد الرصاص السيزيوم الغيرعضوي , رخيصة الأنتاج وسهلة التصنيع . (68 , 69 , 70)

مزايا خلايا البروفسكايت الشمسية

تتميز هذه الخلايا بأن موادها الخام المستخدمة وطرق أنتاجها تعتبران منخفضة الكلفة , بالأضافة لوجود غشاء رقيق جدا يبلغ تقريباً 500 نانومتر يتميز بالأمتصاص العالي للضوء الشمسي المرئي بالكامل , (73 , 74) , وهذه الميزات مجتمعة ولدت وحدات شمسية منخفضة التكلفة وعالية الكفاءة وخفيفة الوزن و مرنة . (75 , 76)

تمتلك خلايا البروفسكايت خصائص كهروضوئية مهمة , مثلاً , طاقة ربط الإكسيتون صغيرة , وهذا يسمح بفصل الفجوات و الألكترونات بسهولة عند إمتصاص الفوتون . وكذلك حامل الشحنة يتميز بمعدل إنتشار عالي و ينتشر لمسافات طويلة مما يسمح لحاملات الشحنة بالتنقل لمسافات طويلة داخل الخلية مما يحسن فرصة إمتصاصها وتحويلها الى طاقة . وتتميز كذلك بنطاق إمتصاص واسع ومعامل أمتصاص عالي مما يزيد من كفاءة إنتاج الطاقة لخلية البروفسكايت عن طريق زيادة نطاق طاقات الفوتون التي يتم إمتصاصها . (77)

بالنسبة لكفائة تحويل الطاقة بالنسبة للخلايا الشمسية احادية الوصلة فهي محددة بحد شوكلي – كويسيه shockly-Queisser limit . يحدد هذا الحد المحسوب الحد الأقصى للكفاءة النظرية للخلية الشمسية بإستخدام وصلة واحدة دون أي خسارة بإستثناء إعادة التركيب الإشعاعي في الخلية الشمسية .

الخلايا الشمسية متعددة الوصلات

الخلايا الشمسية متعددة الوصلات قادرة على تحقيق كفاءة أعلى في تحويل الطاقة PCE مما يزيد من الحد الى أبعد من الحد الأقصى للديناميكية الحرارية الذي حدده شوكلي – كويسيه لخلايا الوصلات الفردية .

من خلال وجود فجوات نطاقية متعددة في خلية واحدة، فإنه يمنع فقدان الفوتونات أعلى أو أسفل طاقة فجوة النطاق لخلية شمسية أحادية الوصلة . (78)

في الخلايا الشمسية ذات الوصلات الترادفية (المزدوجة)، تم تسجيل PCE بنسبة 31.1%، وترتفع إلى 37.9% للخلايا الشمسية ثلاثية الوصلات و38.8% للخلايا الشمسية رباعية الوصلات . ومع ذلك، فإن عملية ترسيب البخار الكيميائي العضوي المعدني (MOCVD) اللازمة لتصنيع الخلايا الشمسية البلورية والشبكية مع أكثر من وصلة هي عملية مكلفة للغاية، مما يجعلها أقل من مرشح مثالي للاستخدام على نطاق واسع . تقدم أشباه الموصلات البيروفسكايت خيارًا لديه القدرة على منافسة كفاءة الخلايا الشمسية متعددة الوصلات، و يمكن تصنيعها في ظل ظروف أكثر شيوعًا وبتكلفة منخفضة جدًا. خلايا البيروفسكايت الشمسية متعددة الوصلات، بالإضافة إلى كونها متاحة للأنتاج الفعال من حيث التكلفة، تحافظ أيضًا على ارتفاع معدل توليد الطاقة في ظل الظروف المناخية القاسية ـ مما يجعلها قابلة للاستخدام في جميع أنحاء العالم . (79)

معالجة خلايا البروفسكايت الشمسية

تتمتع خلايا البيروفسكايت الشمسية بميزة على خلايا السيليكون الشمسية التقليدية في بساطة معالجتها وتحملها للعيوب الداخلية.[80] تتطلب خلايا السيليكون التقليدية عمليات مكلفة ومتعددة الخطوات، يتم إجراؤها في درجات حرارة عالية (> 1000 درجة مئوية) تحت فراغ عالٍ . وفي الوقت نفسه، يمكن تصنيع مادة البيروفسكايت العضوية وغير العضوية الهجينة باستخدام تقنيات الكيمياء الرطبة الأبسط في بيئة معملية تقليدية. على وجه الخصوص، تم إنشاء ثلاثي هاليدات الرصاص الميثيل الأمونيوم والفورمامينيوم، والمعروفة أيضًا باسم البيروفسكايت الهجين، باستخدام مجموعة متنوعة من تقنيات ترسيب المحاليل، مثل الطلاء الدوراني، والطلاء بالفتحة، وطلاء الشفرة، والطلاء بالرش، والطباعة النافثة للحبر، وطباعة الشاشة، والترسيب الكهربائي، وتقنيات ترسيب البخار، وكلها لديها القدرة على التوسع بسهولة نسبية باستثناء طلاء الدوران.

طرق الترسيب Deposition Methods

يمكن تصنيف طريقة المعالجة القائمة على المحاليل إلى ترسيب محلول من خطوة واحدة وترسيب محلول من خطوتين. في الترسيب بخطوة واحدة، يتم ترسيب محلول مركبات البيروفسكايت الذي يتم تحضيره عن طريق خلط هاليد الرصاص والهاليد العضوي معًا، مباشرة من خلال طرق طلاء مختلفة، مثل الطلاء بالدوران، والرش، وطلاء الشفرة، والطلاء بالفتحة، لتشكيل طبقة البيروفسكايت . يعد الترسيب في خطوة واحدة أمرًا بسيطًا وسريعًا وغير مكلف، ولكنه أيضًا أكثر صعوبة للتحكم في تجانس وجودة طبقة البيروفسكايت.

مثلاً , يمكن إذابة هاليد الرصاص وهاليد ميثيل الأمونيوم في مذيب وتدويرهما على الركيزة. يؤدي التبخر اللاحق والتجميع الذاتي بالحمل الحراري أثناء الدوران إلى ظهور طبقات كثيفة من مادة البيروفسكايت المتبلورة جيدًا، وذلك بسبب التفاعلات الأيونية القوية داخل المادة (يساهم المكون العضوي أيضًا في انخفاض درجة حرارة التبلور). ومع ذلك، فإن الطلاء الدوراني البسيط لا ينتج عنه طبقات متجانسة، بل يتطلب بدلاً من ذلك إضافة مواد كيميائية أخرى مثل GBL، وDMSO، وقطرات التولوين . وينتج عن معالجة المحاليل البسيطة وجود فراغات وعيوب أخرى في الطبقة، مما قد يعيق كفاءة الخلية الشمسية.

هناك تقنية أخرى تستخدم استخلاص المذيبات في درجة حرارة الغرفة وتنتج أغشية بلورية عالية الجودة مع تحكم دقيق في سمك يصل إلى 20 نانومتر عبر مساحات تبلغ عدة سنتيمترات مربعة دون توليد ثقوب . في هذه الطريقة، "يتم إذابة مركبات البيروفسكايت في مذيب يسمى NMP وترسيبها على ركيزة . ثم، بدلاً من التسخين، يتم غمر الركيزة في إيثر ثنائي إيثيل، وهو مذيب ثانٍ يلتقط مذيب NMP بشكل انتقائي ويزيله. ما يتبقى هو غشاء فائق النعومة من بلورات البيروفسكايت .

في طريقة اخرى لمعالجة المحلول ، يتم تسخين خليط يوديد الرصاص وهاليد ميثيل الأمونيوم المذاب في DMF . ثم يتم تدوير الخليط على ركيزة يتم الحفاظ عليها عند درجة حرارة أعلى . تنتج هذه الطريقة أغشية موحدة بحجم حبيبي يصل إلى 1 مم .

في الترسيب المكون من خطوتين، يتم ترسيب طبقة هاليد الرصاص أولاً ثم يتفاعل مع الهاليد العضوي لتكوين طبقة البيروفسكايت. يستغرق التفاعل وقتًا حتى يكتمل ولكن يمكن تسهيله عن طريق إضافة قواعد لويس أو هاليد عضوي جزئي إلى مركبات هاليد الرصاص . في طريقة الترسيب المكونة من خطوتين، يمكن لتوسع الحجم أثناء تحويل هاليد الرصاص إلى البيروفسكايت أن يملأ أي ثقوب لتحقيق جودة طبقة أفضل .

في عام 2015، تم اعتماد نهج جديد لتشكيل البنية النانوية PbI2 واستخدام تركيز CH3NH3I العالي لتشكيل غشاء بيروفسكايت عالي الجودة (حجم بلوري كبير وناعم) مع أداء كهروضوئي أفضل . من ناحية، يتم تشكيل PbI2 المسامي المجمع ذاتيًا من خلال دمج كميات صغيرة من الإضافات المختارة بمعايير معينة في محلول مركب PbI2، والتي تسهل بشكل كبير التحول الى البيروفسكايت دون أي بقايا PbI2 . من ناحية أخرى، من خلال استخدام تركيز CH3NH3I مرتفع نسبيًا، يتم تشكيل فيلم CH3NH3PbI3 متبلور بقوة وموحد . وعلاوة على ذلك، هذا نهج غير مكلف .

الترسيب البخاري

يمكن تصنيف عمليات ترسيب طور البخار إلى ترسيب البخار الفيزيائي (PVD) وترسيب البخار الكيميائي (CVD). يشير PVD إلى تبخر البيروفسكايت أو مركباته لتكوين طبقة رقيقة من البيروفسكايت على الركيزة، وهي خالية من المذيبات . بينما يتضمن CVD تفاعل بخار الهاليد العضوي مع طبقة رقيقة من هاليد الرصاص لتحويله إلى طبقة البيروفسكايت .

في التقنيات المساعدة بالبخار، يتم تلدين هاليد الرصاص المطلي أو المقشر في وجود بخار يوديد ميثيل أمونيوم عند درجة حرارة حوالي 150 درجة مئوية . تمتلك هذه التقنية ميزة على معالجة المحاليل، حيث أنها تفتح إمكانية إنتاج أغشية رقيقة متعددة الطبقات على مساحات أكبر. يمكن أن ينطبق هذا على إنتاج الخلايا متعددة الوصلات . بالإضافة إلى ذلك، تؤدي تقنيات الترسيب البخاري إلى اختلاف سمك أقل من الطبقات المعالجة بالمحلول البسيط . ومع ذلك، يمكن أن تؤدي كلتا الطريقتين إلى طبقات رقيقة مستوية أو لأستخدامها في تصميمات مجهرية، مثل هذا التصميم شائع في خلايا البيروفسكايت الحالية أو الخلايا الشمسية الحساسة للصبغ .

قابلية التوسع

لا تتضمن قابلية التوسع فقط توسيع نطاق طبقة امتصاص البيروفسكايت، بل تشمل أيضًا توسيع نطاق طبقات نقل الشحنة والقطب الكهربائي . تحمل كل من عمليات المحاليل والبخار نتائج واعدة من حيث قابلية التوسع . تكلفة العملية وتعقيدها أقل بكثير من تكلفة الخلايا الشمسية السيليكونية . ترسيب البخار أو التقنيات المساعدة بالبخار تقلل من الحاجة إلى استخدام المزيد من المذيبات، مما يقلل من خطر بقايا المذيبات . تدور المشكلات الحالية المتعلقة بخلايا البيروفسكايت الشمسية حول الاستقرار، حيث لوحظ أن المادة تتحلل في الظروف البيئية القياسية، مما يؤدي إلى انخفاض في الكفاءة .

توسيع طبقة الامتصاص

من أجل توسيع نطاق طبقة البيروفسكايت مع الحفاظ على كفاءة عالية، تم تطوير تقنيات مختلفة لتغطية طبقة البيروفسكايت بشكل أكثر تجانسًا . على سبيل المثال، تم تطوير بعض الأساليب الفيزيائية لتعزيز التشبع الفائق من خلال الإزالة السريعة للمذيبات، وبالتالي تقليل وقت نمو الحبيبات وهجرة المذاب .

التسخين، تدفق الغاز، الفراغ، ومضادات المذيبات يمكن أن تساعد جميعها في إزالة المذيبات. والمضافات الكيميائية، مثل مضافات الكلوريد، مضافات قاعدة لويس، مضافات الفاعلة بالسطح، وتعديل السطح، يمكن أن تؤثر على نمو البلورة للتحكم في شكل الغشاء . (84)

توسيع نطاق طبقة نقل الشحنة

يعد توسيع نطاق طبقة نقل الشحنة ضروريًا أيضًا لقابلية التوسع . طبقة نقل الإلكترون المشتركة (ETL) هي TiO_2 وSnO_2 وZnO . حاليًا، لجعل ترسيب طبقة TiO_2 متوافقًا مع ركيزة البوليمر المرنة، تم تطوير تقنيات درجات الحرارة المنخفضة، مثل ترسيب الطبقة الذرية، ترسيب الطبقة الجزيئية، التفاعل الحراري المائي، والترسيب الكهربائي، من أجل ترسيب طبقة TiO_2 المدمجة في مساحة كبيرة . تنطبق نفس الأساليب أيضًا على ترسيب SnO_2 . أما بالنسبة لطبقة نقل الثقب (HTL) ، يتم استخدام NiO_x ، والذي يمكن ترسيبه من خلال معالجة محلول في درجة حرارة الغرفة . (84)

توسيع نطاق القطب الخلفي

يعتبر ترسيب التبخر للقطب الخلفي ناجحاً وقابلاً للتطوير ولكنه يتطلب فراغًا. يعد ترسيب القطب الخلفي الخالي من الفراغ أمرًا مهمًا لإمكانية معالجة المحلول الكامل لـخلايا البروفسكايت PSCs. يمكن طباعة الأقطاب الكهربائية الفضية على السطح، ويمكن طلاء شبكة الأسلاك الفضية النانوية بالرش كقطب كهربائي خلفي . يعتبر الكربون أيضًا مرشحًا محتملًا كقطب كهربائي قابل للتطوير، مثل الجرافيت، وأنابيب الكربون النانوية، والجرافين . (84)

السمية

قضايا السمية المرتبطة بمحتوى الرصاص في الخلايا الشمسية البيروفسكايت تضغط على قبول التكنولوجيا. لقد كان التأثير الصحي والبيئي للمعادن الثقيلة السامة موضع نقاش كبير في حالة خلايا الكادميوم الشمسية CdTe، التي أصبحت كفاءتها ذات أهمية صناعية في التسعينيات . على الرغم من أن CdTe مركب مستقر جدًا حراريًا وكيميائيًا مع منتج منخفض الذوبان ، وبالتالي، تم الكشف عن سميته على أنها منخفضة للغاية، على النقيض من CdTe، فإن البيروفسكايت الهجين غير مستقر للغاية ويتحلل بسهولة إلى مركبات قابلة للذوبان إلى حد ما من الرصاص Pb أو القصدير Sn مما يزيد بشكل كبير من التوافر البيولوجي المحتمل لها وخطر على صحة الإنسان، كما أكدته دراسة السموم الحديثة من أن الجرعة المميتة بنسبة 50% من الرصاص أقل من 5 ملجم لكل كيلوجرام من وزن الجسم، إلا أن المشكلات الصحية تنشأ عند مستويات تعرض أقل بكثير. يمتص الأطفال الصغار ما بين 4 إلى 5 أضعاف كمية الرصاص التي يمتصها البالغون وهم الأكثر عرضة للآثار الضارة للرصاص.(84)

تقليل سمية الرصاص - استبدال الرصاص في البيروفسكايت

تم إجراء دراسات مختلفة لتحليل البدائل المناسبة للرصاص في البيروفسكايت والتي تتميز بشكل مثالي بسمية منخفضة، وفجوات نطاق مباشرة ضيقة، ومعاملات امتصاص بصري عالية، وحركة حاملة شحنة عالية، وخصائص نقل جيدة للشحن، مثل بيروفسكايت القصدير/هاليد الجرمانيوم ، والبيروفسكايت المزدوج ، وهاليدات البزموت/الأنتيمون مع البيروفسكايت .

أظهرت الأبحاث التي أجريت على هاليد القصدير أن لديها كفاءة تحويل طاقة أقل (PCE)، حيث حققت كفاءة تحويل طاقة تبلغ 9.6٪ . يرجع هذا الانخفاض نسبيًا في PCE جزئيًا إلى أكسدة Sn2 إلى Sn4 ، والتي ستكون بمثابة مادة من النوع p في البنية وتؤدي إلى ارتفاع تركيز الناقل الداكن وزيادة معدلات إعادة تركيب الناقل .

أثبتت بيروفسكايت هاليد الجرمانيوم عدم نجاحها بالمثل بسبب انخفاض الكفاءة ومشاكل مع ميول الأكسدة، حيث أظهرت إحدى الخلايا الشمسية التجريبية PCE بنسبة 0.11٪ فقط .

تم الحصول على ارتفاع في مستويات PCE من بعض البيروفسكايت المستندة إلى سبائك الجرمانيوم والقصدير، مع وجود طبقة من Ge0.5I3 CsSn0.5 غير عضوي بالكامل يحتوي على PCE بنسبة 7.11٪ . بالإضافة إلى هذه الكفاءة العالية، تم العثور أيضًا على أن سبائك البيروفسكايت من سبائك الجرمانيوم والقصدير لديها ثبات ضوئي عالي .

تم أيضًا إجراء أبحاث لاستكشاف جدوى هاليدات البزموت/الأنتيمون في استبدال بيروفسكايت الرصاص، خاصة مع Cs3Sb2I9 و Cs3Bi2I9 ، والتي تحتوي على فجوات نطاق تبلغ حوالي 2 الكترون فولت. وقد أظهرت النتائج التجريبية أيضًا أنه في حين تتمتع مركبات PSC القائمة على هاليد الأنتيمون والبزموت باستقرار جيد، فإن قابليتها للحمل المنخفضة وخصائص نقل الشحنة الضعيفة تحد من صلاحيتها في استبدال البيروفسكايت المعتمد على الرصاص . (84)

التغليف للحد من تسرب الرصاص

تم إجراء أبحاث حديثة حول استخدام التغليف كوسيلة لتقليل تسرب الرصاص، مع التركيز بشكل خاص على استخدام البوليمرات . تم إجراء الأبحاث على اثنين من البوليمرات ، Surlyn و راتنج الإيبوكسي المتشابك الحراري ، ثنائي جليسيديل إيثر ثنائي الفينول . أظهرت التجارب انخفاضًا كبيرًا في تسرب الرصاص باستخدام هذه البوليمرات . (84)

الطلاءات لامتصاص تسرب الرصاص

كما تم أيضًا استخدام الطلاءات المرتبطة بالرصاص كيميائيًا بشكل تجريبي لتقليل تسرب الرصاص . على وجه الخصوص، راتنجات تبادل الكاتيون (CERs) وحمض الميثانيديفوسفونيك . (84)

الخصائص الفيزيائية

من الخصائص المهمة لنظام البيروفسكايت الأكثر استخدامًا، هاليدات ميثيل أمونيوم الرصاص، وجود فجوة نطاقية يمكن التحكم فيها من خلال محتوى الهاليد. تعرض المواد أيضًا طول انتشار لكل من الثقوب والإلكترونات يزيد عن ميكرون واحد. ويعني طول الانتشار الطويل أن هذه المواد يمكن أن تعمل بفعالية في بنية الأغشية الرقيقة، وأن الشحنات يمكن نقلها في البيروفسكايت نفسه عبر مسافات طويلة.

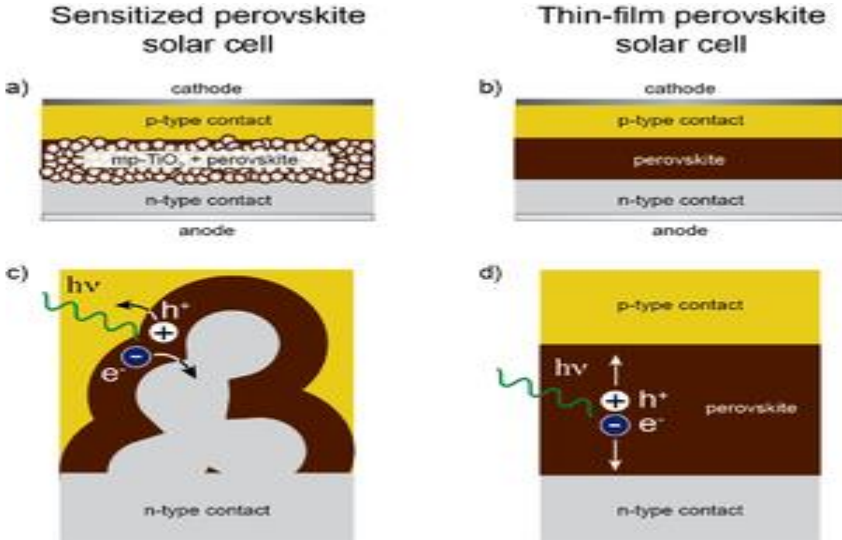
إن الشحنات الموجودة في مادة البيروفسكايت موجودة في الغالب كإلكترونات حرة وفجوات، وليس كإكسيتونات مرتبطة، نظرًا لأن طاقة ربط الإكسيتون منخفضة بما يكفي لتمكين فصل الشحنة في درجة حرارة الغرفة. (84)

الية عمل خلايا البيروفسكايت الشمسية

تعمل خلايا البيروفسكايت الشمسية بكفاءة إلى حد ما اعتمادًا على دور مادة البيروفسكايت في الخلية، أو طبيعة القطب العلوي والسفلي .

الخلايا التي يتم فيها استخلاص الشحنات الموجبة بواسطة القطب السفلي الشفاف (الكاثود)، يمكن تقسيمها في الغالب إلى خلايا "حساسة"، حيث يعمل البيروفسكايت بشكل أساسي كممتص للضوء، ويحدث نقل الشحنة في مواد أخرى، أو "أغشية رقيقة"، حيث يحدث معظم نقل الإلكترون أو الثقب في الجزء الأكبر من البيروفسكايت نفسه. يتم تغليف مادة البيروفسكايت على طبقة مسامية موصلة للشحنة - الأكثر شيوعًا TiO2 - كممتص للضوء. يتم نقل الإلكترونات المولدة ضوئيًا من طبقة البيروفسكايت إلى الطبقة الحساسة المسامية والتي يتم من خلالها نقلها إلى القطب و استخلاصها في الدائرة . (81)

بعد امتصاص الضوء وتوليد الشحنة اللاحقة، يتم نقل كل من حامل الشحنة السالبة والموجبة عبر البيروفسكايت الى الموصلات .



أ) رسم تخطيطي لخلية شمسية من البيروفسكايت الحساسة (84) حيث تتكون الطبقة النشطة من طبقة من TiO2 المسامية المغلفة بمادة امتصاص البيروفسكايت. يتم الاتصال بالطبقة النشطة بمادة من النوع n لاستخراج الإلكترون ومادة من النوع p لاستخراج الثقب . ب) رسم تخطيطي للخلية الشمسية البيروفسكايت ذات الأغشية الرقيقة.(84) التي يتم فيها وضع طبقة مسطحة من البيروفسكايت بين نقطتي اتصال انتقائيتين. ج) توليد الشحنة واستخراجها في البنية الحساسة. بعد امتصاص الضوء في البيروفسكايت، يتم حقن الإلكترون المولد ضوئيًا في TiO2 المسامي الذي يتم من خلاله استخلاصه. يتم نقل الثقب الذي تم إنشاؤه بشكل متزامن إلى مادة من النوع p. د) توليد الشحنة واستخراجها في بنية الأغشية الرقيقة. بعد امتصاص الضوء، يحدث توليد الشحنة وكذلك استخراج الشحنة في طبقة البيروفسكايت.(82,84)

في الآونة الأخيرة، أثبت بعض الباحثين أيضًا بنجاح إمكانية تصنيع خلايا مرنة باستخدام البيروفسكايت، مما يجعلها واعدة أكثر للطلب المرن على الطاقة. من المؤكد أن جانب التدهور الناجم عن الأشعة فوق البنفسجية في البنية الحساسة قد يكون ضارًا للجانب المهم المتمثل في الاستقرار على المدى الطويل. (83)

تصنيع خلايا البيروفسكايت الشمسية

اعتمدت الخلايا الشمسية البيروفسكايت الأولى على الخلايا الشمسية الحساسة للصبغة ذات الحالة الصلبة (DSSCs)، وبالتالي استخدمت TiO2 متوسطة المسام. اتبعت العديد من الخلايا منذ ذلك الحين هذا القالب أو استخدمت Al2O3 ، لكن خطوات درجة الحرارة العالية المطلوبة للتصنيع، وعدم استقرار الأشعة فوق البنفسجية لـ TiO2، أدت إلى إدخال بنية مماثلة للخلايا الرقيقة الأخرى. بعد عدة سنوات أصبحت البيروفسكايت المستوية الآن بنفس الكفاءة تقريبًا.

عادةً ما تتم معالجة طبقة البيروفسكايت نفسها إما عن طريق الترسيب بالفراغ أو المحاليل. جودة الطبقات المترسبة مهمة جدًا. في البداية، أعطت أغشية الترسيب الفراغي أفضل الخلايا، لكن هذه العملية تتطلب التبخير المشترك للمكون العضوي (ميثيل الأمونيوم) في نفس الوقت مع المكونات غير العضوية (هاليد الرصاص)، مما يستلزم غرف تبخير متخصصة . ونتيجة لذلك، بُذلت جهود كبيرة لتحسين الخلايا التي تتم معالجتها بالمحلول، حيث إنها أبسط وتسمح بالمعالجة في درجات حرارة منخفضة، وأصبحت هذه الخلايا الآن متساوية في الكفاءة مع الخلايا المترسبة في الفراغ.

عادةً، يتم ترسيب الطبقة النشطة من خلية البيروفسكايت الشمسية عبر عملية مكونة من خطوة واحدة أو خطوتين. كما ورد ذكره سابقاً , في عملية من خطوة واحدة، يتم طلاء محلول أولي (مثل مزيج من CH3NH3I وPbI2) والذي يتحول بعد ذلك إلى طبقة البيروفسكايت عند التسخين. أحد الاختلافات في هذا هو طريقة "مضاد الإذابة"، حيث يتم طلاء المحلول الأولي في مذيب قطبي، ثم يتم إزالته أثناء عملية الطلاء الدوراني بواسطة مذيب غير قطبي. مطلوب توقيت دقيق للإزالة وأحجام المذيبات لإعطاء الأداء الأمثل. للمساعدة في هذا الأمر، تم بناء مجموعة من مضخات الحقن، مما سمح باستخدام هذه العملية لرفع قيم كفاءة تحويل الطاقة الداخلية إلى ما يزيد عن 16%.

في العملية المكونة من خطوتين، يتم تغليف الهاليد المعدني (مثل PbI_2) بالمكونات العضوية (مثل CH_3NH_3I) حيث يمكن طلاء أغشية الهاليد المعدنية وتُلدينها في غرفة مملوءة ببخار المكون العضوي، والمعروفة باسم "عملية المحلول بمساعدة الفراغ" (VASP).

تعتمد معظم البيروفسكايت الحديثة على هيكل معدني شفاف موصل / ETL / بيروفسكايت / HTL / معدني، حيث يشير ETL و HTL إلى طبقات نقل الإلكترون وطبقات نقل الثقب على التوالي. كما ورد ذكره سابقاً , تشمل طبقات نقل الثقب النموذجية Spiro-OMeTAD أو PEDOT:PSS، وتشمل طبقات نقل الإلكترون النموذجية TiO_2 أو SnO_2. إن فهم وتحسين مستويات الطاقة والتفاعلات بين المواد المختلفة في هذه الواجهات يوفر مجالًا بحثيًا مثيرًا للغاية لا يزال قيد المناقشة.

القضايا الرئيسية لتصنيع الأجهزة العملية للخلايا البيروفسكايت الشمسية هي جودة الغشاء وسمكه. تحتاج طبقة البيروفسكايت (النشيطة) التي تحصد الضوء إلى أن تكون سماكتها عدة مئات من النانومترات، أي أكثر عدة مرات من الخلايا الكهروضوئية العضوية القياسية، وقد يكون إنشاء مثل هذه الطبقات السميكة ذات التجانس العالي أمرًا صعبًا. ما لم يتم تحسين ظروف الترسيب ودرجة حرارة التلدين، سوف تتشكل الأسطح الخشنة ذات التغطية غير الكاملة. حتى مع التحسين الجيد، ستظل هناك خشونة سطحية كبيرة متبقية. ولذلك، يلزم أيضًا وجود طبقات أكثر سمكًا مما يمكن استخدامه عادةً.

تم تحقيق تحسينات في جودة الغشاء من خلال مجموعة متنوعة من الأساليب. إحدى هذه الطرق هي إضافة كميات صغيرة من الأحماض، مثل حمض الهيدرويوديك أو الهيدروبروميك، مقابل قابلية ذوبان كلوريد الرصاص، أو زيادة يوديد الرصاص.

من خلال الجهود البحثية المكثفة، تم تحقيق كفاءات تزيد عن 22% باستخدام طلاء الدوران،كما تم تحقيق كفاءات عالية باستخدام تقنيات معالجة المحاليل الأخرى (مثل طلاء القالب بالفتحة).يشير هذا إلى أن معالجة المحاليل على نطاق واسع للبيروفسكايت أمر ممكن للغاية.

المصادر

1 - Solar cell technologies and the transition to PERC technology - Prof. Dr. Marwan Dhamarin - Head of Toyo Aluminum Semiconductor Factory - International Relations Officer at the Solar Energy Association .

2 - PERC Solar Cell Technology 2018 Edition - 'PERC+ : How to Improve High Efficiency Crystalline Solar Cells Shravan Kumar Chunduri - Michael Schmela - https://www.researchgate.net/publication/354810773 .

3 - IEEE JOURNAL OF PHOTOVOLTAICS- Development of the PERC Solar Cell- Andrew Blakers- received the B.Sc. degree from Australian National University, Canberra, ACT, Australia, in 1978, and the Ph.D. degree from theUniversity of New SouthWales, Sydney, NSW, Australia, in 1984. He is a Professor of Engineering with Australian National University .

4 - A Review on TOPCon Solar Cell Technology - Article *in* Current Photovoltaic Research · September 2021 Eng. Hasnain Yousuf/ Sungkyunkwan University (SKKU) South Korea- Sanchari Chowdhury /Technische Universität München - https://www.researchgate.net/publication/355248522

5 - IBC solar cell - https://sinovoltaics.com/learning-center/solar-cells/ibc-solar-cellsWhat is Heterojunction Solar cell - https://www.thesolarnerd.com/blog/what-is-heterojunction-solar-panel Organic photovoltaics Research - https://www.energy.gov/eere/solar/organic-photovoltaics-research .

6 - TOPCon Solar Technology - 2021 Edition - Shravan Kumar Chunduri - Michael Schmela - https://www.researchgate.net/publication/356891798 .

7 - Processing of Silicon wafers - Kelly Pickerel (May 9, 2016): *Busbars: A solar panel necessity or hindrance*, in solar world - Fraunhofer ISE (September 2013): *Copper metallization for silicon solar cells*. Link to the information brochure - Haomin Chen, Chienyu Chen, Maoyi Chang, C. H. Hsueh, Eva Yen and K. L. Ho (2014

8 - Transfer of POCl3 diffusion processes from atmospheric pressure to high throughput low pressure –Sabrina Lohmüller (née Werner), Stefan Schmidt, Elmar Lohmüller - https://doi.org/10.1063/1.5049301 / 2018

9 - Industrial Silicon Solar Cells - Mehul C. Raval and Sukumar Madugula Reddy

10 - Improving the performance of heterojunction silicon solar cells from the band diagram and surface passivation BODOLALAINA Randriamanalina1, RASTEFANO Elisée2 – 1 PhD student, SE-I-MSDE, ED-STII, Antananarivo ,Madagascar - 2 Thesis Director, SE-I-MSDE, ED-STII, Antananarivo, Madagascar // 2022

11 - POCl3 diffusion for industrial Si solar cell emitter formation - Hongzhao Li - Kyung Kim - Brett Hallam https://www.researchgate.net/publication/309821641 // November 2016

12 - jolyood n-TOPcon solar technology in mass production and investment capacity in Indonesia – Dr. Liu Zhifeng – Jolyood (Taizhou) Solar technology Co. , Ltd. // 2021

13 - SiliconPV: April 03-05, 2012, Leuven, Belgium - Rear contact and BSF formation for local Al-BSF solar cells A. Uruenaa,b,*, J. Horzela, S. Singha, I. Kuzma-Filipeka, E. Cornagliottia, B. J. Johna, R. Mertensa,b, J. Poortmansa,b aImec, Kapeldreef 75, B-3001 Leuven, Belgium bKatholieke University Leuven, Oude Markt 13, Bus 5005, B-3000 Leuven, Belgium – www.sciencedirect.com

14 - SiliconPV: March 25-27, 2013, Hamelin, Germany - Relationships between diffusion parameters and phosphorus precipitation during the POCl3 diffusion process - Amir Dastgheib-Shirazia, Michael Steyera, Gabriel Micarda, Hannes Wagnerb, Pietro P. Altermattb, Giso Hahna – www.sciencedirect.com

15 - Physics of Solar Energy – C. Julian Chen – Columbia University – NewYourk - April 2011

16 - Physics of The Solar Cell by Professor Mohammed Al-Mutawakel

17 – Semi-conductor Physics – chapter 2 – by Dr. Farouk Kamel

18 – W.D. Eades Swanson , R.M., ((Calculation of surface generation and recombination vilocities at the Si-SiO2 interface)) , Journal of applied phisics , vol. 58,p. 4267 , 1985 .

19 - 2.J. G. Fossum, «Physical operation of back-surface-field silicon solar cells», *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 24, pp. 322 - 325, 1977.

20 - Ashcroft ،Neil W.؛ Mermin ،N. David (1976). *Solid State Physics*

21 - "Introduction to Quantum Statistical Thermodyamics" (PDF). Utah State University Physics

22 - *Electronics (fundamentals And Applications)* by D. Chattopadhyay, *Semiconductor Physics and Applications* by Balkanski and Wallis

23 - Kelly Pickerel (May 9, 2016): *Busbars: A solar panel necessity or hindrance*, in Solar Power World .

24 - Fraunhofer ISE (September 2013): *Copper metallization for silicon solar cells*. Link to the information brochure

25 - Haomin Chen, Chienyu Chen, Maoyi Chang, C. H. Hsueh, Eva Yen and K. L. Ho (2014): *The influence of cell busbars pattern on PV module reliability*. Conference Paper – 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, p. 2562-5. Link to research gate article

26 - Solar Cell Production: from silicon wafer to cell , Niclas is Chief Technology Officer at Sinovoltaics Group.

27 - DC arc smelting of silicon , M. Abdellatif , Mintek,Randburg,South Africa , Specialist – Metal condensation , pyrometallurgy Division.

28 - W. Zulehner and B Neuer, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Vol. 23, 5th edition, VCH, 1993, pp.722–740

29 - J. Xue, S. Li, and Z. Wang, Technology developments of silicon metal production in China, Silicon for the Chemical Industry VIII, (H.A. Oye, et al., editors), Trondheim, Norway, June 2006, pp.247–254

30 - C. C. Borges, et al., Development and qualification of reductants for silicon metal smelting, Silicon for the Chemical Industry VIII, Trondheim, Norway, 12–15 June 2006, pp.19–22.

31 - A. Schei, J.K. Tuset, and H. Tveit, Production of high silicon alloys, Trondheim: Tapir Forlag, 1998, pp.52–64.

32 - H. Tveit, et al., The tapping process in silicon production, Silicon for the Chemical Industry VI, (H.A. Oye, et al., editors), Loen, Norway, June 2002, pp.39–46

33 - Production of High Purity Silicon Silica Using AC-arc Furnace with by Carbothermic Reduction of Heated Shaft , High-Technology Research Laboratories, Technical Research Division, Kawasaki Steel Corporation, Kawasaki-cho, Chiba, 1) Chiba-ken, 260Japan.

34 - Siemens Process , The Siemens process involves deposition of silicon from a mixture of purified silane or trichlorosilane (TCS) gas with an excess of hydrogen onto high-purity polysilicon filaments. From: Comprehensive Renewable Energy, 2012

35 - Cz-Si Wafers: History, Properties, Applications , https://nanografi.com/blog/czsi-wafers-history-properties-applications/

36 - Czochralski (CZ) Process Growing of Silicon Wafers , https://www.universitywafer.com/czochralski-growth-silicon-wafers.html

37 - Floating Zone , A floating zone crystallization method melts a feed rod locally by a radio frequency coil and the melted material is just kept between a feed rod and a crystal rod. From: Transport Phenomena in Heat and Mass Transfer, 1992

38 - Solar Cell Production: from silicon wafer to cell, Niclas , sinovoltaics.com

39 - Texturing of monocrystalline silicon wafers by HF-HCl-H_2O_2 mixtures: Generation of random inverted pyramids and simulation of light trapping in PERC solar cells , Solar Energy Materials and Solar Cells

40 - Texturing of large area multi-crystalline silicon wafers through different chemical approaches for solar cell fabrication , Solar Energy Materials and Solar Cells

41 - Etching methods for texturing industrial multi-crystalline silicon wafers: A comprehensive review , Solar Energy Materials and Solar Cells

42 - Global Wind Energy Council, 2018. [Online]. Available: http://www. gwec.net/global-figures/graphs/

43 - Boom and Bust, 2018. [Online]. Available: https://endcoal.org/ wp-content/uploads/2018/03/BoomAndBust_2018_r4.pdf

44 - International Technology Roadmap for Photovoltaic Results 2017, 9th ed., Fig. 41, 2018. [Online]. Available: http://www.itrpv.net/

45 - M. A. Green and R. B. Godfrey, "MIS solar cell—General theory and new experimental results for silicon," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 9, pp. 610–612, 1976.

46 - A. W. Blakers and M. A. Green, "678 mV open circuit voltage silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 39, pp. 483–485, 1981.

47 - A. W. Blakers *et al.*, "18% efficient terrestrial silicon solar cell," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. EDL-5, no. 1, pp. 12–13, Jan. 1984.

48 - M. A. Green, A. W. Blakers, S. Jiqun, E. M. Keller, and S. R. Wenham, "19.1% efficient silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 44, pp. 1163–1165, 1984.

49 - A. W. Blakers and M. A. Green, "20% efficient silicon solar cell," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 48, pp. 215–217, 1986.

50 - R. Sinton, Stanford University, private communication, 1988.

51 - A.W. Blakers *et al.*, "22.6% efficient silicon solar cells," in *Proc. 4th Int.Photovolt. Sci. Eng. Conf.*, Sydney, Australia, Feb. 1989, pp. 801–806.

52 - T. Dullweber and J. Schmidt, "Industrial silicon solar cells applying the passivated emitter and rear cell (PERC) concept—A review," *IEEE J. Photovolt.*, vol. 6, no. 5, pp. 1366–1381, Sep. 2016.

53 - Hermle, M., "Silicon solar cells-current production and future concepts," Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE (2017).

54 - Stenzel, F., Lee, B.G., Cieslak, J., Schwabedissen, A., Wissen, D., Geißler, S., Rudolph, T., Faulwetter-Quandt, B., Hönig, R., Wasmer, S., Bakowskie, R., "Exceeding 23% and mass production of p-Cz Q. ANTUM bifacial solar cells, 36th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, pp. 96-99 (2019).

55 - Rahman, M.Z., "Advances in surface passivation and emitter optimization techniques of c-Si solar cells," Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, pp. 734-742 (2014).

56 - Feldmann, F., Bivour, M., Reichel, C., Hermle, M., Glunz, S.W., "Passivated rear contacts for high-efficiency n-type Si solar cells providing high interface passivation quality and excellent transport characteristics," Solar energy materials and solar cells, Vol. 120, pp. 270-274 (2014).

57 - Cousins, P.J., Smith, D.D., Luan, H.C., Manning, J., Dennis, T.D., Waldhauer, A., Wilson, K.E., Harley, G., Mulligan, W.P., "Generation 3: Improved performance at lower cost," 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, pp. 000275-000278, IEEE (2010).

58 - Green, M.A., Hishikawa, Y., Dunlop, E.D., Levi, D.H., Hohl-Ebinger, J., Ho-Baillie, A.W., “Solar cell efficiency tables (version 51),” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 26, No. 1, pp. 3-12 (2018).

59 - Haase, F., Hollemann, C., Schäfer, S., Merkle, A., Rienäcker, M., Krügener, J., Brendel, R., Peibst, R., “Laser contact openings for local poly-Si-metal contacts enabling 26.1%-efficient POLOIBC solar cells,” Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 186, pp. 184-193 (2018).

60 - Stodolny, M.K., Lenes, M., Wu, Y., Janssen, G.J.M., Romijn, I.G., Luchies, J.R.M., Geerligs, L.J., “n-Type polysilicon passivating contact for industrial bifacial n-type solar cells,” Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 158, pp. 24-28 (2016).

61 - Nandakumar, N., Rodriguez, J., Kluge, T., Groβe, T., Fondop, L., Padhamnath, P., Balaji, N., König, M., Duttagupta, S., “Approaching 23% with large-area monoPoly cells using screenprinted and fired rear passivating contacts fabricated by inline PECVD,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 27, No. 2, pp. 107-112 (2019).

62 - M. Rahmouni, A. Datta, P. Chatterjee, J. Damoon-Lacoste, C. Ballif, P. Roca i Cabarrocas, J. Appl. Phys. 107, 054521 (2010).

63 - Wenham S. R., Green M. A. and Watt M. E, «Applied Photovoltaic», Bridge Printer, Sidney, (1994).2015

64 - S. M. Sze & K. Ng Kwok. Physics of semiconductor devices. John Wiley & Sons, 3 edition, 2007.

65 - Ameri, Tayebeh; Dennler, Gilles; Lungenschmied, Christoph; Brabec, Christoph (2009). "Organic tandem solar cells: A review". *Energy & Environmental Science*. 2 (4): 348. doi:10.1039/B817952B. Retrieved 2019-05-20.

66 - Manser, Joseph S.; Christians, Jeffrey A.; Kamat, Prashant V. (2016). *"Intriguing Optoelectronic Properties of Metal Halide Perovskites"*. Chemical Reviews. 116 (21): 12956–13008.

67 - Hamers, Laurel (26 July 2017). "Perovskites power up the solar industry". *Science News*.

68 - Kojima, Akihiro; Teshima, Kenjiro; Shirai, Yasuo; Miyasaka, Tsutomu (May 6, 2009). "Organometal Halide Perovskites as Visible-Light Sensitizers for Photovoltaic Cells". *Journal of the American Chemical Society*. 131 (17): 6050–6051. doi:10.1021/ja809598r. PMID 19366264

69 - Best Research-Cell Efficiencies" (PDF). *National Renewable Energy Laboratory*. 2022-06-30. Retrieved 2022-07-12 .

70 - Min, Hanul; Lee, Do Yoon; Kim, Junu; Kim, Gwisu; Lee, Kyoung Su; Kim, Jongbeom; Paik, Min Jae; Kim, Young Ki; Kim, Kwang S.; Kim, Min Gyu; Shin, Tae Joo; Il Seok, Sang (21 October 2021). "Perovskite solar cells with atomically coherent interlayers on SnO2 electrodes". *Nature*. 598 (7881): 444–450

71 - Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie. "World record again at HZB: Almost 30 % efficiency for next-generation tandem solar cells". *HZB Website*.

72 - Sun, Kai; Wang, Yanyan; Xu, Haoyuan; Zhang, Jing; Zhu, Yuejin; Hu, Ziyang (2019). "Short-Term Stability of Perovskite Solar Cells Affected by In Situ Interface Modification". *Solar RRL*. 3 (9): 1900089.

73 - Stefano Razza; Sergio Castro-Hermosa; Aldo Di Carlo; Thomas M. Brown (2016). "Research Update: Large-area deposition, coating, printing, and processing techniques for the upscaling of perovskite solar cell technology". *APL Materials*. 4 (91508): 091508. Bibcode:2016APLM....4i1508R. doi:10.1063/1.4962478

74 - Wan-Jian Yin; Tingting Shi; Yanfa Yan (15 May 2014). "Unique Properties of Halide Perovskites as Possible Origins of the Superior Solar Cell Performance". *Advanced Materials*. 26 (27): 4653–4658. Bibcode:2014AdM....26.4653Y. doi:10.1002/adma.201306281. PMID 24827122. S2CID 27113056.

75 - Sai Nithin R. Kantareddy; Ian Mathews; Shijing Sun; Mariya Layurova; Janak Thapa; Juan-Pablo Correa-Baena; Rahul Bhattacharyya Tonio Buonassisi; Sanjay E. Sarma; Ian Marius Peters (2019). "Perovskite PV-powered RFID: enabling low-cost self-powered IoT sensors". *IEEE Sensors Journal*. 20 (1): 471–478. arXiv:1909.09197. Bibcode:2020ISenJ..20..471K. doi:10.1109/JSEN.2019.2939293. S2CID 202712514.

76 - O'Connor, David; Hou, Deyi (November 2021). "Manage the environmental risks of perovskites". *One Earth*. 4 (11): 1534–1537.

77 - Chen, Xiang; Zhou, Hai; Wang, Hao (2021). "2D/3D Halide Perovskites for Optoelectronic Devices". *Frontiers in Chemistry*. 9: 715157.

78 - McMeekin, David; Mahesh, Suhas; Noel, Nakita; Klug, Matthew; Lim, JongChul; Warby, Jonathan; Ball, James; Herz, Laura; Johnston, Michael; Snaith, Henry (2019-02-11). "Solution-Processed All-Perovskite Multi-Junction Solar Cells". *Proceedings of the 11th International Conference on Hybrid and Organic Photovoltaics*. Vol. 3. València: Fundació Scito.

79 - Werthen, J.G. (June 1987). "Multijunction concentrator solar cells". *Solar Cells*. 21 (1–4): 452. doi:10.1016/0379-6787(87)90150-5

80 - Jun, Kang (10 January 2017). "High Defect Tolerance in Lead Halide Perovskite CsPbBr3". *The Journal of Physical Chemistry Letters*. 8 (2): 489–493. doi:10.1021/acs.jpclett.6b02800. OSTI 1483838. PMID 28071911

81 - Stranks, S. D.; Eperon, G. E.; Grancini, G.; Menelaou, C.; Alcocer, M. J. P.; Leijtens, T.; Herz, L. M.; Petrozza, A.; et al. (October 17, 2013). "Electron-Hole Diffusion Lengths Exceeding 1 Micrometer in an Organometal Trihalide Perovskite Absorber". *Science*. 342 (6156): 341–344. Bibcode:2013Sci...342..341S. doi:10.1126/science.1243982. PMID 24136964. S2CID 10314803.

82 - Eperon, Giles E.; Burlakov, Victor M.; Docampo, Pablo; Goriely, Alain; Snaith, Henry J. (2014). "Morphological Control for High Performance, Solution-Processed Planar Heterojunction Perovskite Solar Cells". *Advanced Functional Materials*. 24 (1): 151–157.

83 - Docampo, Pablo; Ball, James M.; Darwich, Mariam; Eperon, Giles E.; Snaith, Henry J. (2013). "Efficient organometal trihalide perovskite planar-heterojunction solar cells on flexible polymer substrates". *Nature Communications*.

84 - Tan, Hairen (November 2020). "All-perovskite tandem solar cells with 24.2% certified efficiency and area over 1 cm2 using surface-anchoring zwitterionic antioxidant". *Nature Energy*. 5 (11): 870–880.

85 - Crystalline Silicon (c-Si)-Based Tunnel Oxide Passivated Contact (TOPCon) Solar Cells: A Review Hayat Ullah 1 , Stanislaw Czapp 1,* , Seweryn Szultka 1 , Hanan Tariq 1 , Usama Bin Qasim 2 and Hassan Imran 3

86 - Perovskites and Perovskite Solar Cells: An Introduction “https://www.ossila.com/pages/perovskites-and-perovskite-solar-cells-an-introduction”



Photovoltaic Cell Production & Technologies'

qasamsolar@gmail.com

الطبعة الأولى